

O. PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. KARL KORDINA
INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

UNTERSUCHUNGEN ZUR STANDSICHERHEIT
VON WÄNDEN IN ALTER BAUSUBSTANZ
UNTER HORIZONTALDRUCK

ABSCHLUSSBERICHT

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovensstraße 52
D-3300 Braunschweig

VORGELEGT VON:

PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. KARL KORDINA

DIPL.-ING. THOMAS WESTPHAL

DIPL.-ING. ERHARD GUNKLER

BRAUNSCHWEIG, NOVEMBER 1986

DAS FORSCHUNGSVORHABEN WURDE GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTER DES
INNERN UNTER DEM AZ. Z S 8 - 122 - 42

INHALTSVERZEICHNIS

	Blatt
1. Einleitung und Aufgabenstellung	2
2. Versuchsdurchführung	5
2.1 Belastungskonstruktion	6
2.2 Steuer- und Meßeinrichtungen	7
2.3 Versuchsablauf und Meßwerte	11
3. Das Anspannen der Zugstangen und dessen Einfluß auf die Schnittgrößen	14
4. Ergänzende Untersuchungen	18
4.1 Güte der Mauersteine	18
4.2 Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Mauerwerks und Ermittlung einheitlicher Spannungs-Dehnungs-Beziehungen	19
5. Rechnerische Überprüfung der Versuchsergebnisse	25
5.1 Lastverteilung	25
5.2 Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen	26
5.2.1 Tragmodell	26
5.2.2 Diskussion der Berechnungsergebnisse	31
5.2.3 Beurteilung der Ergebnisse	33
5.3 Überprüfung der Durchbiegungen	35
5.3.1 Vereinfachte Spannungs-Dehnungs-Linien	35
5.3.2 Zusammenhang zwischen Moment, Normalkraft und Krümmung	37
5.3.3 Rechnerische Überprüfung der gemessenen Durchbiegungen	41
6. Vorhersage der Tragfähigkeit von einachsig gespannten Mauerwerkspfeilern	45
6.1 Querschnittstragfähigkeit von Mauerwerk	45
6.2 Verformungen und Traglast des zu untersuchenden Pfeilers	46
7. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf zweiachsig gespannte Mauerwerkswände	50
8. Zusammenfassung	58
9. Literaturverzeichnis	60
Anhang	62

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE

GEOMETRISCHE GRÖSSEN

l	Pfeilerhöhe
d	Dicke des Mauerwerkspfeilers
b	Breite des Mauerwerkspfeilers
A	Fläche des Versuchspfeilers, die durch ein Druckkissen belastet wird
W	Widerstandsmoment
w	Mittendurchbiegung des Versuchspfeilers
w_j	Durchbiegung des Mauerwerks, gemessen am Rollengerät j ; ($j = 1$ bis 5)
e	Normalkraftausmitte
e_{St}	Normalkraftausmitte am Kopf- und Fußpunkt des Prüfpfeilers
e_F	Normalkraftausmitte in halber Höhe des Mauerwerkspfeilers
f	Druckbogenstich
f_1	Druckbogenstich gemäß Ansatz 1 (Bild 15)
f_2	Druckbogenstich gemäß Ansatz 2 (Bild 15)
f_e	rechnerisch maximal auftretender Druckbogenstich
x	Druckzonenhöhe
ϵ_{Zi}	Dehnung der Stahl-Zugstange i ; ($i = 1$ bis 4)
ϵ	Stauchung
ϵ_u	Stauchung im Bruchzustand
ϵ_s	zur Druckfestigkeit des Mauerwerks gehörige Stauchung
$\bar{\epsilon}_s$	zum Mittelwert der Druckfestigkeit gehörige Stauchung
K	Krümmung
K_u	Krümmung im Bruchzustand
k	bezogene Krümmung

FESTIGKEITSWERTE

β	Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen des zentrisch beanspruchten Mauerwerks
β_s	Druckfestigkeit des Mauerwerks
$\bar{\beta}_s$	Druckfestigkeit des Mauerwerks aus einer Versuchsreihe
$\beta_{BZ,x}$	Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen
$\beta_{BZ,x}^o$	Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen, durch Versuche ohne Berücksichtigung von Auflasten ermittelt
$\beta_{BZ,y}$	Biegezugfestigkeit senkrecht
$\beta_{s,Q}$	Druckfestigkeit des Mauerwerks unter Berücksichtigung von Querdruck

$\beta_{s,e}$	Druckfestigkeit des exzentrisch belasteten Mauerwerks
$\bar{\beta}_{s,e}$	aus einer Versuchsreihe gemittelte Druckfestigkeit des exzentrisch belasteten Mauerwerks
C_{St}	Federsteifigkeit der Kopf- und Fuß einspannung

MATERIALWERTE

E	Elastizitätsmodul des Mauerwerks
E_0	Elastizitätsmodul im Ursprung der σ - ε -Linie für exzentrisch belastetes Mauerwerk

BELASTUNGEN, KRAFTGRÖSSEN, SPANNUNGEN

q	Horizontalbelastung des Mauerwerkspfeilers, allgemeine
p	Luftdruck im Druckkissen, gemessen am Einlaßventil der Belastungseinrichtung
p_L	gleichmäßig verteilter Belastungsdruck auf den Mauerwerkspfeiler
$p_{L,R}$	rechnerisch ermittelter, gleichmäßig verteilter Luftkissendruck im Bruchzustand
Z_i	gemessene Zugstangenkraft; ($i = 1$ bis 4)
H_Z	aus den Zugstangenkräften der Versuchseinrichtung ermittelte Gesamthorizontalkraft
H_P	aus dem Belastungsdruck im Luftkissen ermittelte Gesamthorizontalkraft
S	Stabbogenkraft des Tragmodells gemäß Bild 14
S_H	Horizontalkomponente der Stabbogenkraft S
S_V	Vertikalkomponente der Stabbogenkraft S
N	Pfeilernormalkraft
N_u	Pfeilernormalkraft im Bruchzustand
N^I	Pfeilernormalkraft aus gleichmäßig verteilten Wandauflasten
N^{II}	Pfeilernormalkraft unter Berücksichtigung der Spreizwirkung und Biegeverformung der Mauerwerkspfeiler
N_{30°	Pfeilernormalkraft, ermittelt aus einer Last einzugsfläche, deren Breite sich unter einem Winkel von 30° ausbildet
n	normierte Pfeilernormalkraft
n_u	normierte Pfeilernormalkraft im Bruchzustand
M	Biegemoment im Versuchspfeiler, allgemein
M_x	Biegemoment, welche parallel zu den Lagerfugen Zugspannungen erzeugt
M_y	Biegemoment, welches senkrecht zu den Lagerfugen Zugspannungen erzeugt
M_0	Biegemoment am gedachten, statisch bestimmten Ersatzsystem infolge wirklichkeitsnaher Druckverteilung im Druckkissen

M_L	Biegemoment am gedachten, statisch bestimmten Ersatzsystem infolge gleichmäßig verteilter Horizontalbelastung
M_F	Miegemoment in halber Höhe des Versuchspfeilers
M_{St}	Biegemoment in den Haltepunkten des Mauerwerkspfeilers
M_u	Bruchmoment des Querschnitts
$M_{u,x}$	Bruchmoment parallel zu den Lagerfugen
$M_{u,y}$	Bruchmoment senkrecht zu den Lagerfugen
$M_{o,u}$	Tragmoment am gedachten, statisch bestimmten Ersatzsystem im Bruchzustand
$M_{o,u}^{II}$	Biegemoment am gedachten, statisch bestimmten Ersatzsystem
M_o^I	Biegemoment nach Theorie I. Ordnung am gedachten, statisch bestimmten Ersatzsystem
ΔM^{II}	Zusatzmoment nach Theorie II. Ordnung
m	normiertes Biegemoment des Versuchspfeilers
m_u	normiertes Biegemoment des Versuchspfeilers im Bruchzustand
$M'_{u,y}$	Bruchmoment, senkrecht zu den Lagerfugen ohne Einbeziehung der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks
$M''_{u,y}$	Bruchmoment, senkrecht zu den Lagerfugen unter Berücksichtigung der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks
σ	Normalspannung, allgemein
σ_y	mittlere Normalspannung, senkrecht zu den Lagerfugen
σ_Q	Pfeilernormalspannung unter Berücksichtigung von Querdruck
σ_m	gemittelte Normalspannung, bezogen auf die Gesamtfläche des Querschnitts
σ_{dm}	gemittelte Normalspannung, bezogen auf die Biegedruckzone: $\sigma_{dm} = FN \cdot \beta_s$

KOPFZEIGER, allgemein

I	Theorie I. Ordnung
II	Theorie II. Ordnung
°	ohne Berücksichtigung von Auflasten
'	ohne Berücksichtigung der Biegezugfestigkeit
''	mit Berücksichtigung der Biegezugfestigkeit

VERHÄLTNISGRÖSSEN und weitere Bezeichnungen

FN	Völligkeitsbeiwert der Biegedruckzone
FM	auf die Druckzonenhöhe bezogener Wert für den Abstand der Spannungsergebnisierenden von der Spannungsnulllinie
FA	Wert zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Luftkissendruckverteilung
LSt	Laststufe

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Der Schutzraumbau in der Bundesrepublik Deutschland hinkt bekanntermaßen weit hinter den Anstrengungen anderer, auch blockfreier Staaten her. Ziviler Bevölkerungsschutz, das bedeutet auch Schutz vor nichtmilitärischen Katastrophen, ist zur Zeit nicht opportun - und zwar sowohl aus politischen wie auch aus wirtschaftlichen Gründen. Versuche einzelner Gruppen, dieses Versäumnis zu bemängeln, ändern an dem vorliegenden Zustand nichts. Deshalb ist als Mindestmaßnahme wenigstens zu überprüfen, welchen Schutz die vorhandene Bausubstanz den Bürgern bieten kann.

Die bautechnischen Grundsätze für Hausschutzräume des Grundschutzes sehen derzeit - neben einem ABC-Schutz - den Schutz gegen herabfallende Trümmer und gegen Brandeinwirkung vor. Weil die Schutzwirkung von Mauerwerk gegen die Einwirkung bestimmter Gase durch vergleichsweise einfache Maßnahmen hinreichend verbessert werden kann, dürfen die Umfassungswände solch eines Schutzraumes auch aus Mauerwerk bestehen; eine trümmersichere Decke aus Stahlbeton mit genügender Tragfähigkeit ist jedoch Voraussetzung. Die Frage des Strahlungsschutzes ist gleichermaßen von Interesse, jedoch getrennt zu beurteilen.

Hausschutzräume werden in der Regel im Keller eingerichtet; in Gebäuden alter Bausubstanz bestehen die Kellerwände überwiegend aus Mauerwerk. Da bereits seit langem erkennbar ist, daß staatliche Initiativen zur Förderung des Schutzraumbaues - wenn überhaupt - vorzugsweise Neubauten zugute kommen sollen, ergibt sich das dringende Anliegen, Wege aufzuzeigen, wie in bestehenden, auch älteren Gebäuden schützende Räume nachträglich ohne übermäßigen Kostenaufwand eingerichtet werden können. Dafür muß jedoch bekannt sein, welche Druckstoßresistenz das Mauerwerk in der vorhandenen alten Bausubstanz - noch - bietet.

Deshalb ist im Rahmen eines vom Bundesamt für Zivilschutz geförderten Forschungsvorhabens 1983 bis 1985 die Biegetragfähigkeit einige Jahrzehnte alten Mauerwerks bei statischer Horizontalbelastung (wandnormaler Druckbeanspruchung) untersucht worden.

Die Auswahl der Gebäude richtete sich vorrangig nach der Art der vorhandenen Bausubstanz und war abhängig von der Zustimmung der Eigentümer zur Durchführung der geplanten Untersuchungen. Daneben waren als technische Merkmale Mauerwerksart, lichte Raumhöhen, Vielfalt der Waddicken zur Variation der Pfeilerschlankheit und die Wandanordnung in den aufgehenden Geschossen ausschlaggebend.

Als geeignet erwiesen sich schließlich zwei Gebäude einer alten Kaserne (Baujahr ca. 1935), die umgebaut werden sollten. Hier standen Wände aus Vollziegelmauerwerk unterschiedlicher Dicke sowie unterschiedlicher Stein-, Mauermörtel- und Putz-Qualität zur Verfügung.

In diesen Gebäuden wurden die Untersuchungen der Biegetragfähigkeit an Wandpfeilern in zwei Abschnitten durchgeführt:

1. Vorversuche im Gebäude 1:

(Grundrisse und Schnitte siehe Bild 29)

Mauerwerk A: Waddicke 24,5 cm

Mauerwerk B: Waddicke 38,5 cm

2. Hauptversuche im Gebäude 2:

(Grundrisse und Schnitte siehe Bilder 30 bis 32)

Mauerwerk C: Waddicke 12 cm

Mauerwerk D: Waddicke 25 cm

Insgesamt wurden zehn Wandpfeiler untersucht.

Die Bilder 29 bis 57 und die Tabellen 9 bis 11 sind im Anhang zu diesem Bericht zusammengefaßt. Hinweise auf diese Bilder und Tabellen sind nicht unterstrichen.

Die Vorversuche wurden vorab ausgewertet und über ihre Ergebnisse auf der Jahrestagung der Schutzkommission 1984 in Bad Schwalbach berichtet.

Im folgenden werden alle durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang behandelt, die Auswertung aber insbesondere auf die Ergebnisse der Hauptversuche gestützt.

2. Versuchsdurchführung

Die Prüfung der Tragfähigkeit vertikal belasteter Wände unter Horizontaldruck bei Einbeziehung der gesamten Wandfläche läßt sich in einem vorhandenen Gebäude aus folgenden Gründen mit vertretbarem Aufwand nicht durchführen:

- Das Herausdrücken einer tragenden Wand ist üblicherweise mit einem nicht hinnehmbaren Verlust an Standisicherheit für das gesamte Gebäude verbunden;
- die Versuchseinrichtung wäre wegen der zu erwartenden unterschiedlichen Wandabmessungen nicht universell verwendbar und wegen ihres hohen Gewichts auch nicht mehr von Hand zu transportieren;
- die Ermittlung der vom Mauerwerk aufnehmbaren Biegezugspannungen, die den Traglastanteil der Wand in waagerechter Richtung bestimmen, gestaltet sich sehr schwierig: es sind verhältnismäßig große und ungestörte Probekörper erforderlich.

Die Biegetragfähigkeit einer Mauerwerkswand hängt von zahlreichen Parametern ab, z.B.

Geometrie:

- Wanddicke und Mauerwerksverband
- Abmessungen bzw. Seitenverhältnis in Länge und Höhe
- Vorhandensein von Aussparungen

Lagerungsbedingungen:

- Einspannungen und/oder Gelenke in waagerechter und senkrechter Richtung

Werkstoffeigenschaften:

- Festigkeits- und Verformungsverhalten parallel und senkrecht zu den Lagerfugen

Vorbelastung:

- Normalkräfte (Scheibenkräfte) parallel und senkrecht zu den Lagerfugen

Wegen dieser Parametervielfalt und -anzahl mußten die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens auf die Biegetragfähigkeit von senkrechten Mauerwerksstreifen (Pfeiler) mit einachsiger Tragrichtung beschränkt werden. Ein solches System liefert den unteren Grenzwert der Biegetragfähigkeit einer Mauerwerkswand mit zweiachsiger Tragwirkung.

Einzelheiten zu diesem Versuchskonzept und dem Versuchsaufbau werden im folgenden näher erläutert:

2.1 Belastungskonstruktion

Um in einer zu Untersuchungszwecken ausgewählten Wand einen Pfeiler definierter Abmessung und Tragrichtung zu erhalten, wurden in die Wand jeweils zwei in 60 cm Abstand durch den gesamten Wandquerschnitt verlaufende, ca. 2 m lotrechte Schlitzte gesägt. Eine Seite des so geschaffenen Wandstreifens wurde aufgrund der als günstiger erachteten Raumsituation zur Belastungsseite erklärt und dort ein Widerlager, bestehend aus vier senkrecht angeordneten [-260-Stahlprofilen und horizontal liegenden 6 cm dicken Eichenbohlen, errichtet. Zwischen den Eichenbohlen und dem Wandpfeiler sind Druckkissen (Fabrikat Vetter - bis 8 bar Druck belastbar) zur Horizontalbelastung der Mauerwerkspfeiler angeordnet worden.

Die vier Stahlträger [-260 wurden mittels Zugstangen (Spannstähle St 885/1080 mit 15 mm Durchmesser) auf der dem Druckkissen abgewandten Seite an Stahltraversen kraftschlüssig verankert. Hierzu wurden die Zugstangen in Bohrungen durch das Mauerwerk geführt. Die Stützweite (Höhe) der Belastungseinrichtung beträgt 2,00 m, ist also im Regelfall nur wenig niedriger als die lichte Höhe im Versuchsraum.

Die Belastungseinrichtung und die Anordnung der Meßwertaufnehmer ist in Bild 01 dargestellt. Zum Transport von Hand in alte, verwinkelte Kellerräume kann sie in Einzelteile von gerade noch zu bewältigendem Gewicht zerlegt werden.

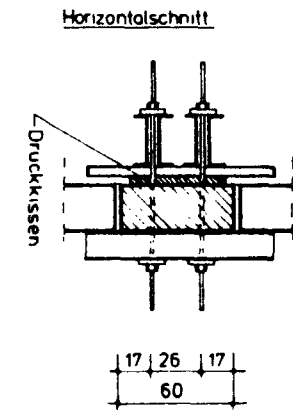
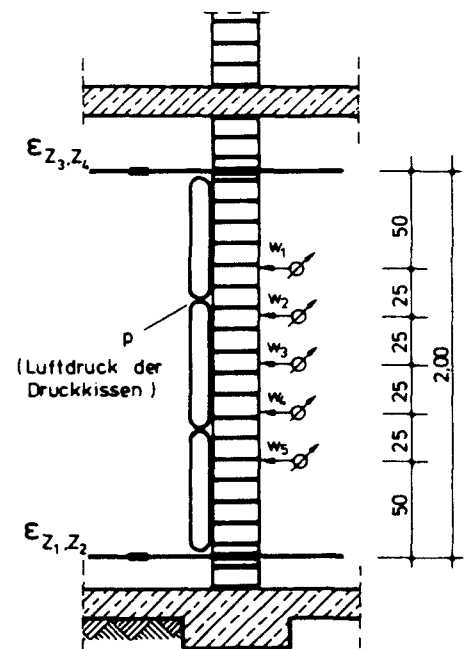
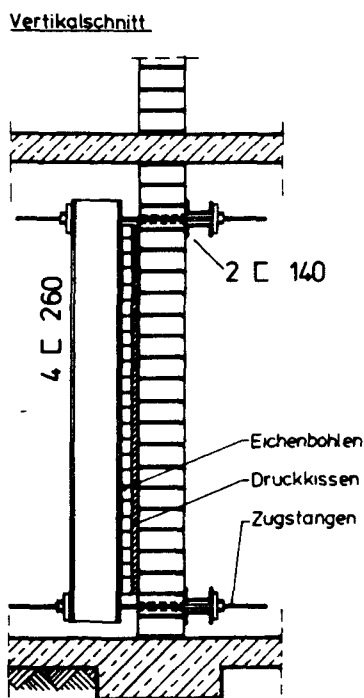


Bild 01: Belastungskonstruktion und Anordnung der Meßwertaufnehmer



2.2 Steuer- und Meßeinrichtungen

Als Meßgrößen zur Bestimmung von Belastung und Verformungen wurden in jedem Versuch mindestens ermittelt:

- der Luftdruck der Druckkissen p (Feinmanometer)
- die Dehnung der Stahl-Zugstangen $\epsilon_{Z_1-Z_4}$ (Dehnmeßstreifen = DMS)
- die Durchbiegung des Mauerwerks w_{1-5} (Rollengeräte 1:8)

Die genaue Meßstellenanordnung bei den einzelnen Versuchen ist aus den Bildern 33 bis 42 ersichtlich.

Die Belastung wurde vor Ort mit Druckluft aus Stahlflaschen über die Druckkissen auf die Wandpfeiler aufgebracht. Die Schrittweite der Belastung (Manometeranzeige) wurde der Reaktion aus Dehnung und Durchbiegung angepaßt. Mit zunehmendem Abstand der beanspruchten Flächen blähen sich die Druckkissen auf, wobei sich die belastete Fläche etwas verringert, was bei der Auswertung berücksichtigt worden ist.

Die Horizontalbeanspruchung der Mauerwerkspfeiler wurde aus der Dehnung der Stahlzugstangen (überwiegend \varnothing 15 mm), auf denen DMS angebracht waren, bestimmt. Hierzu wurden die Zugstangen als Kraftmeßelemente kalibriert.

Die Biegelinie des Wandpfeilers wurde mit Hilfe von Rollengeräten ermittelt. Die zeitliche Änderung der Durchbiegung gibt Aufschluß über die Tragwirkung und die Ausnutzung des Wandquerschnitts unter Last.

Die Normalkräfte, die im Pfeiler unter Belastung auftreten, können nicht allein aus den Lasten, die auf dem Pfeiler ruhen, ermittelt werden, weil sich bei der Pfeilerdurchbiegung unter Horizontaldruck Zwangskräfte in lotrechter Richtung einstellen, durch die zusätzliche Lasten in benachbarten Wandbereichen geweckt werden, wie im folgenden näher ausgeführt wird.

Die in Bild 02 dargestellte Vorderansicht der Prüfwand macht vereinfacht die Erhöhung der Wandauflast im Vergleich zu ihrer ursprünglichen Belastung außerhalb der gedachten Verlängerung der Trennschlitze nach oben deutlich. Es stellt sich offensichtlich, mit zunehmender Entfernung von Pfeilerkopf und -fuß größer werdende Lasteinzugsbreite ein, aus deren Wirkungsbereich die Traglast der zu prüfenden Mauerwerkswand gebildet wird.

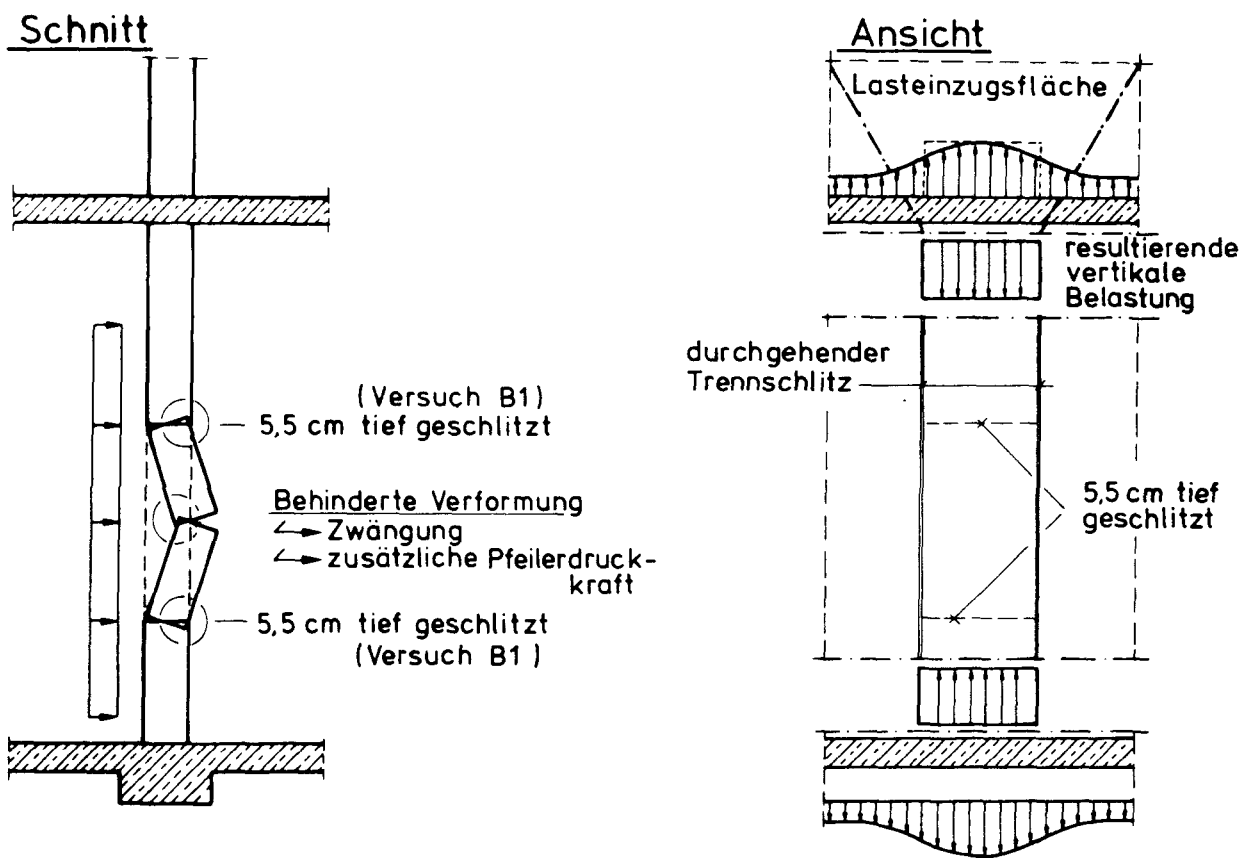


Bild 02: Spreizwirkung des Pfeilers

Diese Lastaktivierung durch Spreizung sollte zunächst durch horizontale Schlitzte im Pfeiler - über dem Auflager - vermieden werden. Allerdings führte die Verbesserung der Rotationsfähigkeit nicht zum Erfolg. Auch erbrachten Versuche, die Dehnungen im Mauerwerk oberhalb des Pfeilers zu messen und damit die Pfeilerdruckkraft indirekt zu bestimmen, nicht die erwünschte Aussage. In weiteren Versuchen wurde daher die Pfeilerdruckkraft durch formschlüssigen Einbau von Druckmeßgeräten (Meßzellen) oberhalb der oberen Quertraverse in Abhängigkeit von der Pfeilerdurchbiegung direkt ermittelt.

Diese Meßzellen bestehen im wesentlichen aus zwei mit DMS versehenen Stahlrollen, die zwischen Druckplatten angeordnet sind (Bild 03). Zum Zwecke des Einbaus wurde aus dem Pfeiler eine Ziegellage entfernt und an deren Stelle die Meßzellen in Mörtel eingesetzt.

Ohne Querbelastung aus Anspannung der Zugstangen oder Kissen-
druck ist der Pfeiler - mit Ausnahme des Pfeilereigengewichts -
wegen der Entnahme der Steine am Pfeilerkopf normalkraftfrei;
die Auflasten aus der aufgehenden Wand werden auf die benach-
barten Wandbereiche umgelagert.

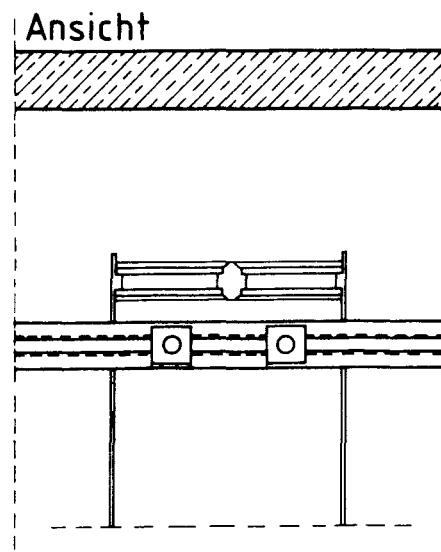
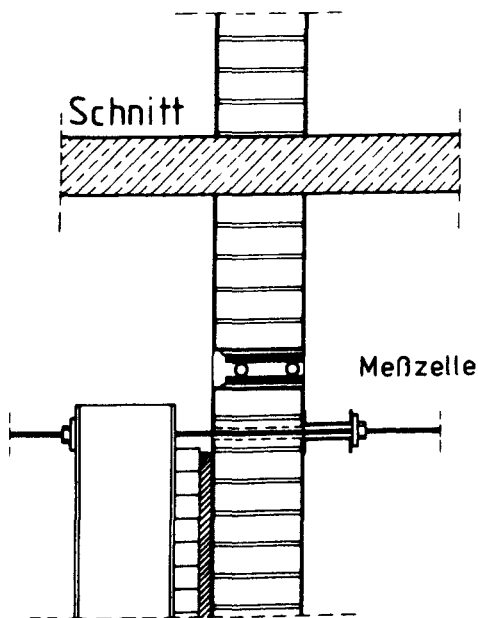
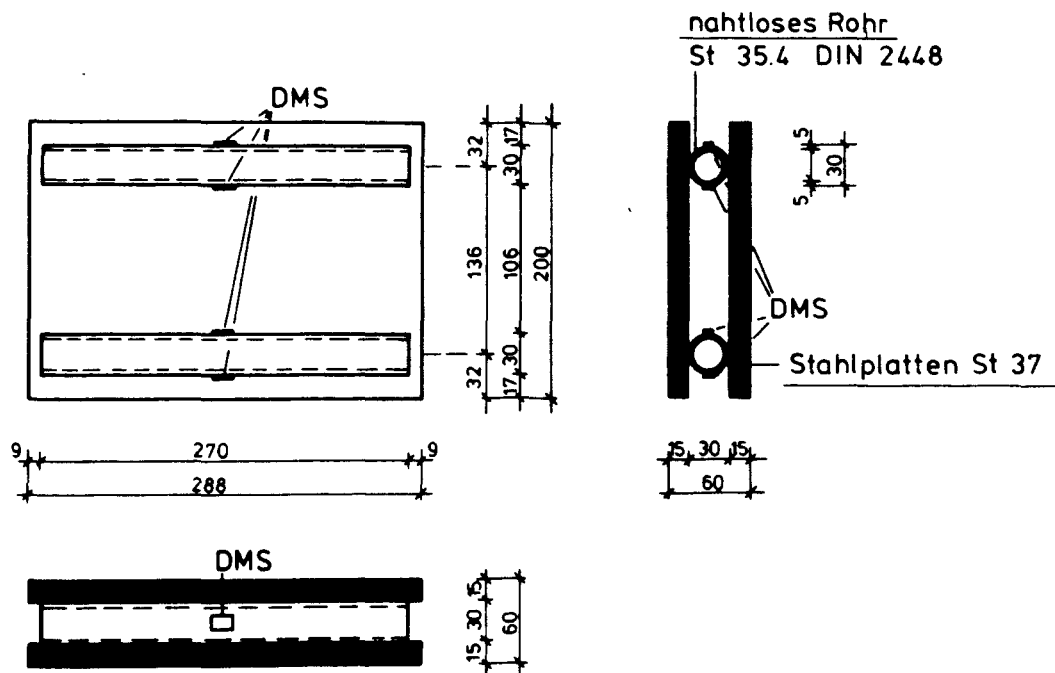


Bild 03: Meßzellen zur Ermittlung der Normalkräfte:
Prinzip und Einbau

Bei einigen Pfeilern wurden in halber Stützweite Dehnmeßstreifen zur Nachprüfung der rechnerisch ermittelten Mauerwerksdehnungen in den Viertelpunkten der Stützweite (\sim Momentennullpunkt) auf beiden Pfeileroberflächen angeordnet, vgl. Bilder 33 bis 42.

2.3 Versuchsablauf und Meßwerte

Sämtliche Versuche mußten mehr unter baustellenähnlichen als unter Laboratoriumsbedingungen durchgeführt werden. Insbesondere erfolgten die Vorversuche im ersten Gebäude bei niedrigen Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt und hoher Luftfeuchtigkeit in Kellerräumen ohne Elektroinstallation. Der Versuchsauf- und Abbau mußte einschließlich der Messungen innerhalb eines Tages bewältigt werden, um möglichen Diebstahl der Meß- und Belastungseinrichtung vorzubeugen, was jeweils einen großen Personaleinsatz erforderlich machte.

Die beiden für die Hauptversuche verwandten Mauerwerksarten unterschieden sich deutlich: Mauerwerk C war im Vergleich zu Typ D handwerklich sauber unter Verwendung von Zementmörtel erstellt worden. Im Mauerwerk D hatte man dagegen Kalk als Bindemittel verwendet und teilweise schlampig gemauert. Somit waren für das Mauerwerk C verlässlichere Ergebnisse zu erwarten.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Angaben zum Versuchsablauf für sämtliche Versuche zusammengefaßt, auch findet man dort, welche Meßgrößen neben Druckkissendruck, Zugstangenkraft und Durchbiegung noch erfaßt worden sind. Auf eine Wiedergabe der Meßwerte der einzelnen Laststufen wird in diesem Bericht verzichtet; sämtliche Einzelwerte sind tabelliert und liegen teilweise auch in digitalisierter Form auf Kassette für weiterführende Auswertungen vor.

Die last- und ortsabhängige Biegeverformung ist in den Bildern 43 bis 52 wiedergegeben.

Versuchs-Nr.		A1	B1	B2	C1	C2	C3	D1	D2	D3	D4
Nähere Angaben siehe Bild		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Wanddicke	cm	24,5	38,5	38,5	12,0	12,0	12,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Putz		nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein
Auftreten des 1. Risses bez. auf die maximale Horizontallast		0,35	0,35	0,15	0,10	0,05	1)	0,30	0,20	0,25	1)
Rißanzahl		3	2	1	1	2	1	6	4	2	4
Kissendruck der letzten Laststufe	bar	2,44	4,80	6,60	0,60	0,69	0,60	1,75	1,90	2,10	1,60
Zwischenentlastungen bei folgenden Drücken	bar			4,60			0,15 0,30 0,45			0,50 1,00 1,50	0,50 1,00 1,50
Mittendurchbiegung bei der letzten Laststufe	cm	2,55	0,98	2,38	4,85	3,60	2,30	4,19	3,90	5,92	2,30
Bleibende Mitten- durchbiegung nach Entlastung	cm	2)	?	2)	1,50	0,93	0,70	2,33	2,76	4,08	5,92
Zusätzliche Meßgrößen:											
1 Normalkraft mit Meßkästen	kN				*	*	*	*	*	*	*
2 Verformungen in den Viertelspunkten des Pfeilers	‰	*			*	*	*	*	*	*	*
3 Verformungen in Pfeilermite (DMS)	‰	*					*			*	*
4 Verformungen neben dem Pfeiler (DMS)	‰	*									
5 Verformungen über dem Pfeiler (ind. Weggeber)	µm		*	*							

1) Ermittelte Werte $\geq 0,50$, bedingt durch schlechte Erkennbarkeit bei fehlendem Putz

2) Pfeiler zerstört

Tabelle 1: Angaben zum Versuchsablauf und Meßwerte

Wie aus Tabelle 1 entnommen werden kann, betrug die horizontale Traglast (Kissendruck) unter der gegebenen Normalkraft bei den einzelnen Mauerwerkstypen:

C	:	12 cm	0,6 bis 0,7 bar
A und D:		~ 25 cm	1,6 bis 2,5 bar
B	:	38,5 cm	4,8 und 6,6 bar

Die Mittendurchbiegung stellte sich kurz vor Erreichen der Traglast auf etwa maximal 6 cm ein. Der Kenntnis der in den Versuchen gemessenen Durchbiegungen kommt für die anschließende theoretische Erörterung der Standsicherheit von Wänden in alter Bausubstanz unter horizontaler Belastung eine besondere Bedeutung zu, da der Vergleich von Meß- und Rechenwerten eine Überprüfung der Richtigkeit des verwendeten theoretischen Ansatzes gestattet.

3. Das Anspannen der Zugstangen und dessen Einfluß auf die Schnittgrößen

Um die Lage der Belastungseinrichtung während des Versuchs zu sichern, war es durch "handfestes" Anziehen der Muttern auf den Zugstangen (Spannstahl mit Gewinde) erforderlich, Belastungseinrichtung und Mauerwerk gegeneinander zu verspannen. Diese Anspannung hat jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Schnittgrößen im Pfeiler: Hierdurch wird eine, an Pfeilerkopf und Pfeilerfuß konzentrierte Horizontalbelastung hervorgerufen, die zu Biegebeanspruchungen und geringen Verformungen des Prüfpfeilers führt, wodurch wiederum Normalkräfte im Mauerwerkskörper auftreten. Die Größenordnung dieses Effekts ist durch das Kraft-Übersetzungs-Verhältnis der Gewinde zu erklären. Im vorliegenden Fall ergibt sich bereits bei leichtem Anziehen der Muttern eine Zugstangenvorspannung von je 3,50 kN, d.h. eine Gesamtanspannung bei vier Zugstangen von $4 \times 3,0 = 12 \text{ kN}$. Dies ist ein Wert, der bei der Ermittlung der Horizontalbelastung der Pfeiler nicht mehr vernachlässigt werden darf.

Die Anspannung der Zugstangen läßt sich näherungsweise direkt durch Messung und indirekt auf zeichnerischem Wege ermitteln:

Bestimmung durch Messung:

Der Nullabgleich der Meßelemente (DMS auf Zugstangen und in Meßzellen) erfolgte nach Aufbau der Versuchseinrichtung und somit nach Aufbringen der Anspannung. Bei vollständiger Entlastung (nach Versuchsende) wurden daher negative Meßwerte angezeigt, die der Anspannung der Zugstangen bzw. der dadurch hervorgerufenen Vorbelastung der Meßzellen entsprechen.

Bestimmung durch zeichnerische Ermittlung:

Trägt man die Zugstangenkraft (Z) über dem Kissendruck auf, zeigen die Meßwerte aller Versuche den in Bild 04 oben dargestellten Verlauf: Im Bereich A nimmt die Zugstangenkraft zunächst nur sehr langsam zu, um bei höherem Kissendruck einem nahezu linearen Verlauf zu folgen (Bereich B). Nahe der Bruchlast vermindert sich die Zunahme der Zugstangenkraft (Bereich C), zu er-

klären durch starkes Anwachsen der Pfeilerdurchbiegung unter Verringerung der Druckkissen-Belastungsfläche.

Aus dem Zusammenhang zwischen den Meßwerten für Kissendruck und Zugstangenkräften kann durch Verlängerung des linear verlaufenden Bereichs B die Vorspannung der Zugstangen abgeschätzt werden, vgl. Bild 04a.

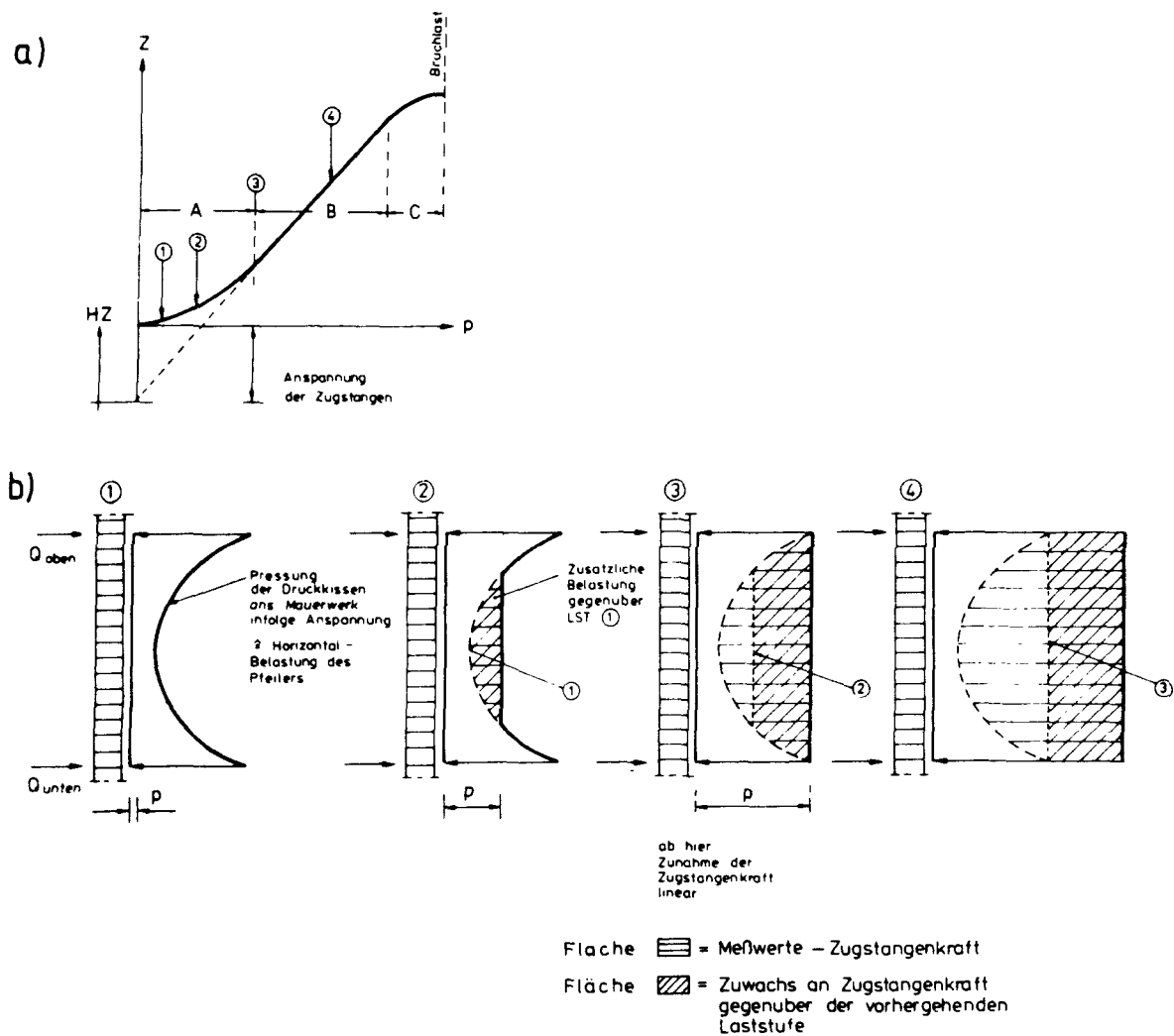


Bild 04: Zusammenhang zwischen Zugstangenkraft und Kissendruck

Nach Überwinden des Einflusses der Zugstangenanspannung auf die Verteilung der Horizontalbelastung (Bereiche B und C) müssen

Die Größenordnung der zusätzlichen Pfeilerbelastung infolge Zugstangenanspannung ist in Tabelle 2 zusammengefaßt. Ein Vergleich zwischen den Werten für die Zugstangenanspannung, die durch Extrapolation ermittelt wurden, mit denen, die nach Versuchs-ende bei weitgehender Entlastung der Pfeiler gemessen wurden, liefert eine befriedigende Übereinstimmung. Die Werte der Spalte 5 kennzeichnen den Beginn des Bereichs B in Bild 04a. Oberhalb dieser Laststufen darf von einer gleichmäßigen Verteilung der Horizontallast ausgegangen werden.

Mit Hilfe der Kraftmeßzellen konnte die Pfeilernormalkraft in Abhängigkeit von der Mittendurchbiegung festgestellt werden: In Bild 05 ist für die Hauptversuchsreihen C und D der Verlauf der normierten Normalkraft n in Abhängigkeit der auf die Wanddicke bezogenen Durchbiegung w/d in halber Pfeilerhöhe dargestellt. Die Vorbelastung der Meßzellen durch das Anspannen der Zugstangen ist bei $w = 0$ deutlich zu erkennen. Von hieraus nimmt die normierte Normalkraft mit der Durchbiegung nichtlinear bis zu ihrem Scheitelwert zu. Bei darüber hinaus anwachsender Durchbiegung entzieht sich der Pfeiler infolge Zerstörung des Mauerwerksgefüges einer weiteren Laststeigerung.

Nach Auswertung und Berücksichtigung der Anspannung in den Meßwerten der Zugstangen und Meßzellen ist die Beanspruchung der Pfeiler durch Horizontal- und Normalkraft bekannt.

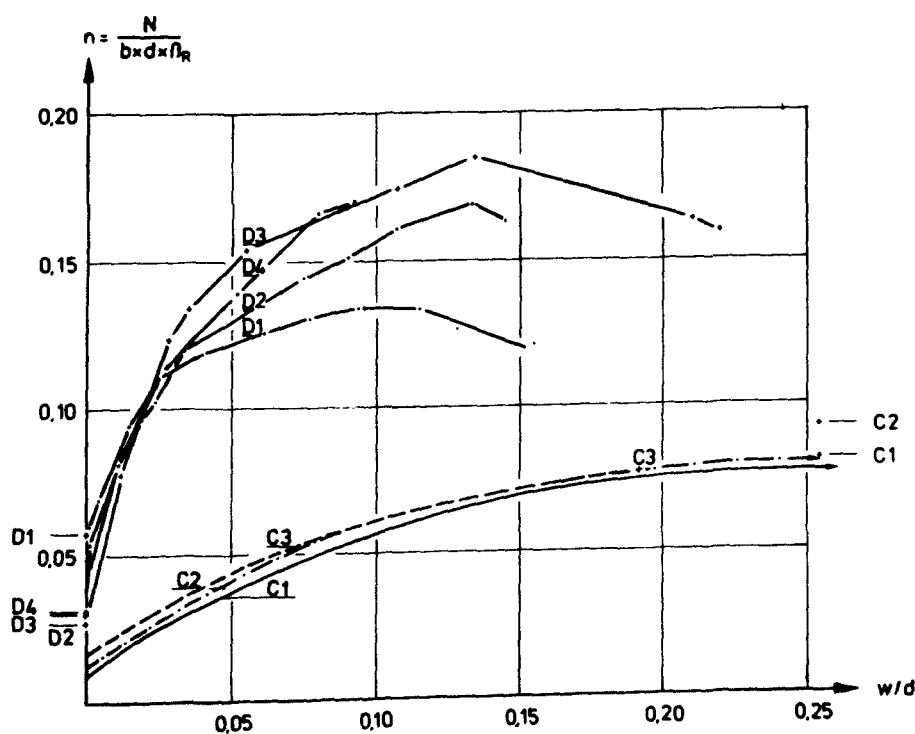


Bild 05: Normalkraft in Abhängigkeit von der Mittendurchbiegung; normierte Darstellung

Mauerwerkstyp	Anspannung zeichnerisch extrapoliert	Anspannung nach Versuchs- ende gemessen	Zur Anspannung gehörige Normalkraft (Vorbelastung der Meßzellen)	Kissendruck bei Überwinden der Anspannung gemäß Bild 04
	KN	kN	kN	bar
A1	22,0	-	-	0,75
B1	-	-	-	-
B2	27,0	-	-	1,25
C1	5,1	0,1	9,5	0,25
C2	4,6	5,3	13,6	0,20
C3	9,1	9,7	16,2	0,30
D1	16,0	18,3	46,1	1,3/1,6
D2	6,5	5,4	21,6	
D3	45,1	41,1	24,5	
D4	44,0	54,7	35,6	

Tabelle 2: Angaben zur Pfeilerbelastung infolge Anspannung der Zugstangen

4. Ergänzende Untersuchungen

Zur Nachprüfung der Last-Verformungseigenschaften unter mittlerer und ausmittiger Druckbeanspruchung wurden Mauerwerksprismen untersucht, die am Bau entweder aus belastetem oder zusätzlich freigeschnittenen Wandpfeilern entnommen worden sind.

4.1 Güte der Mauersteine

In der unten dargestellten Tabelle sind die Rohdichte und Druckfestigkeiten von Ziegeln, die den Mauerwerkstypen A, C und D entstammen, nach Prüfung gemäß DIN 105 zusammengestellt.

Der Elastizitätsmodul rissefreier Steine beträgt etwa 20000 N/mm².

Typ	Rohdichte kg/dm ³	Druckfestigkeit N/mm ²
A	1,72	13,0
	1,53	16,6
	1,47	13,8
C	1,63	47,8*
	1,66	23,7
D	1,44	15,0
	1,45	16,1
	1,62	18,6
	1,66	16,6

*) Hier sind vermutlich Steine unterschiedlicher Güte im Mauerwerk der zu untersuchenden Prismen verarbeitet worden.

Tabelle 3: Vorgefundene Steingüten

4.2 Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Mauerwerks und Ermittlung einheitlicher Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

Die Kenntnis der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen im Mauerwerk ist zur Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens der untersuchten Wandpfeiler erforderlich. Hierzu wurden weitere Prüfungen an Mauerwerksprismen durchgeführt. Dabei wurden die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen überwiegend an solchen Prüfkörpern ermittelt, die vier oder fünf Steinschichten besaßen.

Anfangs wurden die Mauerwerkskörper lastgesteuert einer mittigen oder ausmittigen Beanspruchung ausgesetzt. Weil die Versuchsauswertung aber einen großen plastischen Bereich der σ - ϵ -Linie erkennen ließ, wurden die weiteren Versuche weggesteuert durchgeführt, um den Verlauf der σ - ϵ -Beziehung auch nach dem Erreichen der Höchstlast mit einbeziehen zu können.

In Tabelle 4 sind die äußeren Merkmale der untersuchten Mauerwerksprismen in bezug auf deren Gestalt und Belastungsgeschichte sowie der Versuchsdurchführung tabellarisch zusammengefaßt.

	A1/N	B1/N	B2/N	B3/N	C1/N	C2/N	C3/N	C4/N	D1/N	D2/N	D3/N	D4/N	D5/N	D6/N
lastgesteuert	x	x	x	x	x				x	x	x			
weggesteuert						x	x	x					x	x
mittig	x	x	x	x	x	x		x	x				x	x
ausmittig							x			x	x			
vorbelastet	x	x	x	x	x	x	x	x			x			
Anzahl der Steinlagen	2	4	3	2	5	4	4	5	5	5	4		4	4

Tabelle 4: Art und Umfang der ergänzenden Untersuchungen an Mauerwerkspfeilern

Gemessen wurden:

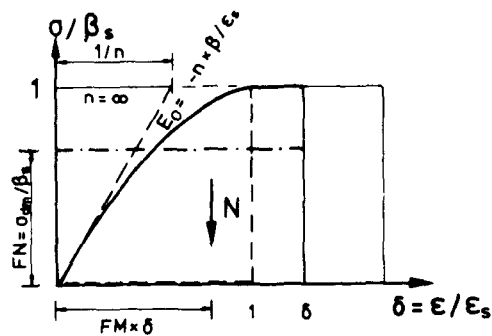
- (1) Mauerwerksdehnung (induktive Weggeber über eine oder mehrere Lagerfugen,
- (2) Steinstauchungen ausgewählter Steine (Dehnmeßstreifen)
- (3) Verkürzung des Abstandes der Belastungsplatten bei weggesteuerten Versuchen (in die Prüfmaschine integrierter Weggeber - Auswertung unter Berücksichtigung der Prüfmaschinenverformung in Abhängigkeit von der Belastung).

Die unter mittlerer Belastung gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sind in den Bildern 07 und 08 dargestellt; die Bilder 56 bis 57 zeigen Randstauchungen und Krümmungen ausmittig belasteter Körper in Abhängigkeit von der mittleren Spannung.

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle noch etwas über die gemessenen Stein- bzw. Fugenstauchungen ausgesagt werden.

Der Anteil der Steinstauchungen an der Gesamtverformung der einzelnen zu untersuchenden Mauerwerkstypen war unterschiedlich groß. Beim Typ C betrug der Anteil der Steinstauchungen rd. 30 % der Mauerwerksstauchung (Stein- und Fugenverformung zusammen), hingegen nahmen im Mauerwerk des Typs D wegen der minderen Mörtelqualität die Fugen nahezu allein die gesamte Verformung auf. Hier betrugen die Steinstauchungen etwa 2 - 5 % der Mauerwerksstauchungen. Der Absolutwert der Fugenstauchungen im Bruch betrug beim Mauerwerk des Typs C rd. 12 ‰, beim Typ D ca. 60 ‰.

Zusammen mit den Formbeiwerten FN und FM über die Gestalt der sich ergebenden Druckzone (siehe Bild 06), sind in Anlehnung an eine Veröffentlichung von Quast /3/ die normierten σ - ϵ -Beziehungen der einzelnen Prüfkörper der Versuchsreihen C und D



	Bereich $\delta = \epsilon/\epsilon_s \leq 1$	$\delta \geq 1$
σ/β	$1 - (1-\delta)^n$	1
FN	$1 - \frac{1-(1-\delta)^{n+1}}{(n+1)\delta}$	$1 - \frac{1}{(n+1)\delta}$
FN×FM	$\frac{1}{2} - \frac{1 + [(n+1)(1-\delta) - (n+2)](1-\delta)^{n+1}}{(n+1)(n+2)\delta^2}$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{(n+1)(n+2)\delta^2}$

FN: Völligkeitsbeiwert der Biegedruckzone

FM: Auf die Druckzone bezogener Abstand der Spannungs-Resultierenden von der Spannungs-Nulllinie

FN · FM: Biegetragfähigkeitsbeiwert, bezogen auf den Ursprung der Biegedruckzone

Bild 06: Normierte Spannungs-Dehnungs-Linie nach /3/

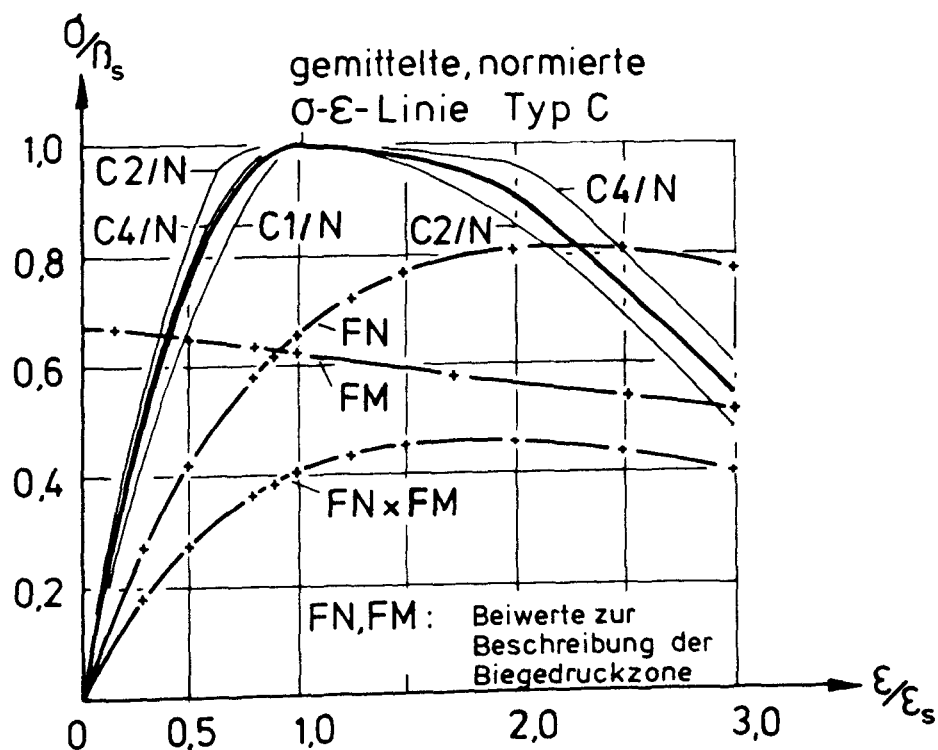


Bild 07: Normierte Spannungs-Dehnungs-Linien des Mauerwerks-

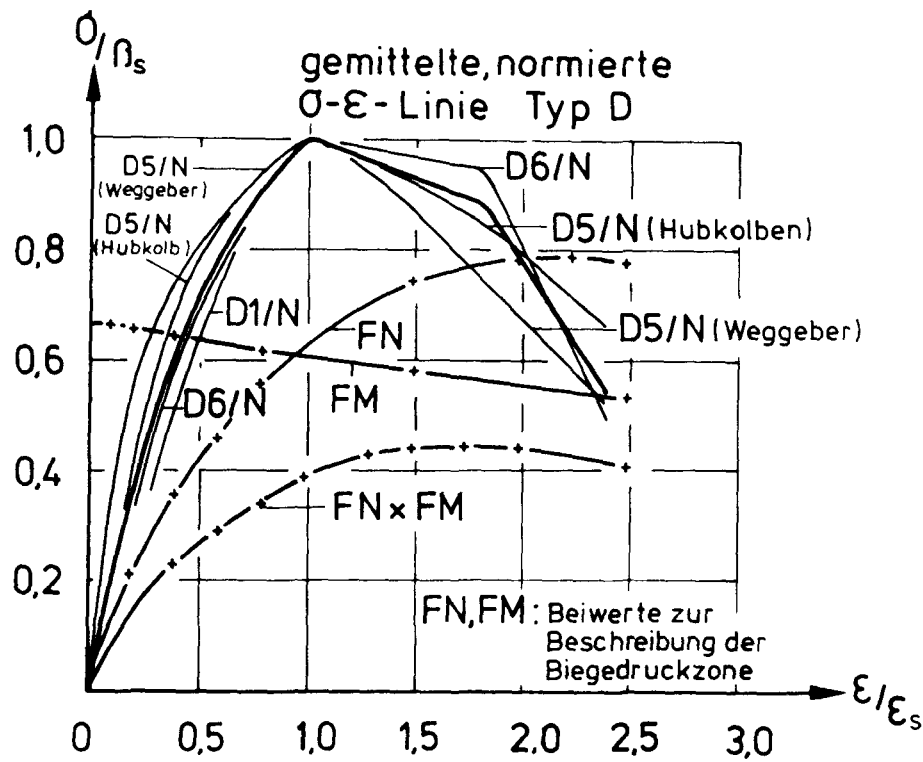


Bild 08: Normierte Spannungs-Dehnungs-Linien des Mauerwerks-typs D unter mittiger Belastung

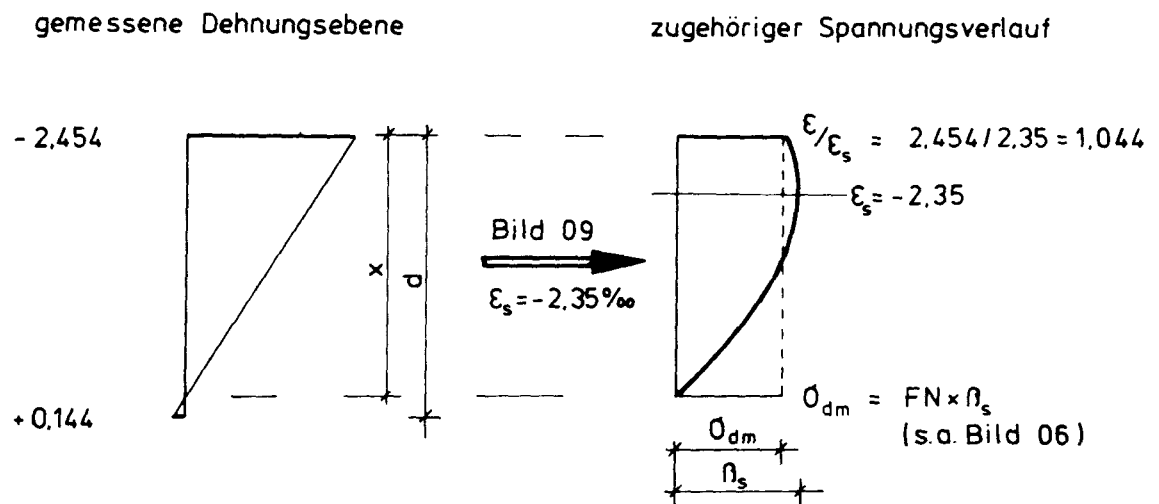
Am Beispiel der Versuchsreihe C sollen nun einige Aussagen über das aufnehmbare Moment und über die maximale Druckfestigkeit $\beta_{s,e}$ des ausmittig belasteten Mauerwerkskörpers gemacht werden.

Das aufnehmbare Moment der Biegedruckzone erreicht zwischen $\epsilon/\epsilon_s = 1,4 - 2,2$ annähernd gleichbleibend seinen Größtwert. Dies findet sich auch in den Meßwerten des ausmittig beanspruchten Versuches C3/N wieder (vgl. Pfeile in Bild 56):

max P:	$\sigma_m = 9,45 \text{ N/mm}^2$	$\epsilon/\epsilon_s = 3,14/2,35 = 1,35$
	$\sigma_m = 9,43 \text{ N/mm}^2$	$\epsilon/\epsilon_s = 3,94/2,35 = 1,70$

Form und Fließgrenze der unter mittiger Belastung ermittelten σ - ϵ -Linie dürfen also zumindest näherungsweise auch dem ausmittigen Versuch C3/N zugrunde gelegt werden.

Die Druckfestigkeit ermittelt sich am Beispiel eines ausgewählten Meßwertes nunmehr wie folgt (vgl. Bild 56):



Mittlere Spannung im Versuchskörper (d):

$$\sigma_m = -8,81 \text{ N/mm}^2$$

Mittlere Spannung in der Biegedruckzone (x):

$$\sigma_{dm} = -8,81 \cdot (-2,454) / (-2,454 + 0,144) = 9,32 \text{ N/mm}^2$$

Aus Bild mit $\epsilon/\epsilon_s = 1,044$ ergibt sich $FN = 0,67$.

Also: $\beta_{s,e} = \sigma_{dm} / FN = 9,32 / 0,67 = 13,9 \text{ N/mm}^2 (= 1,45 \beta_s)$

Für benachbarte Meßwerte konnte die gleiche Druckfestigkeit ermittelt werden.

Die Werte für die Druckfestigkeit der ausmittig belasteten Versuchskörper D2/N und D3/N können entsprechend der Vorgehensweise beim Mauerwerkstyp C bestimmt werden. Man erhält:

D2/N	:	β_s	=	-4,0 N/mm ²
D3/N	:	$\beta_{s,e}$	=	-6,0 N/mm ²
im Mittel:		$\bar{\beta}_{s,e}$	=	-5,0 N/mm ² (= 127 % · β_s)

Aus den Mittelwerten für die Druckfestigkeit $\bar{\beta}_s$ und der dazu gehörigen gemittelten Stauchung $\bar{\epsilon}_s$ ergeben sich für die Mauerwerkstypen C und D die in den Bildern 09 und 10 dargestellten σ - ϵ -Linien als weiter zu verwendende Arbeitslinien.

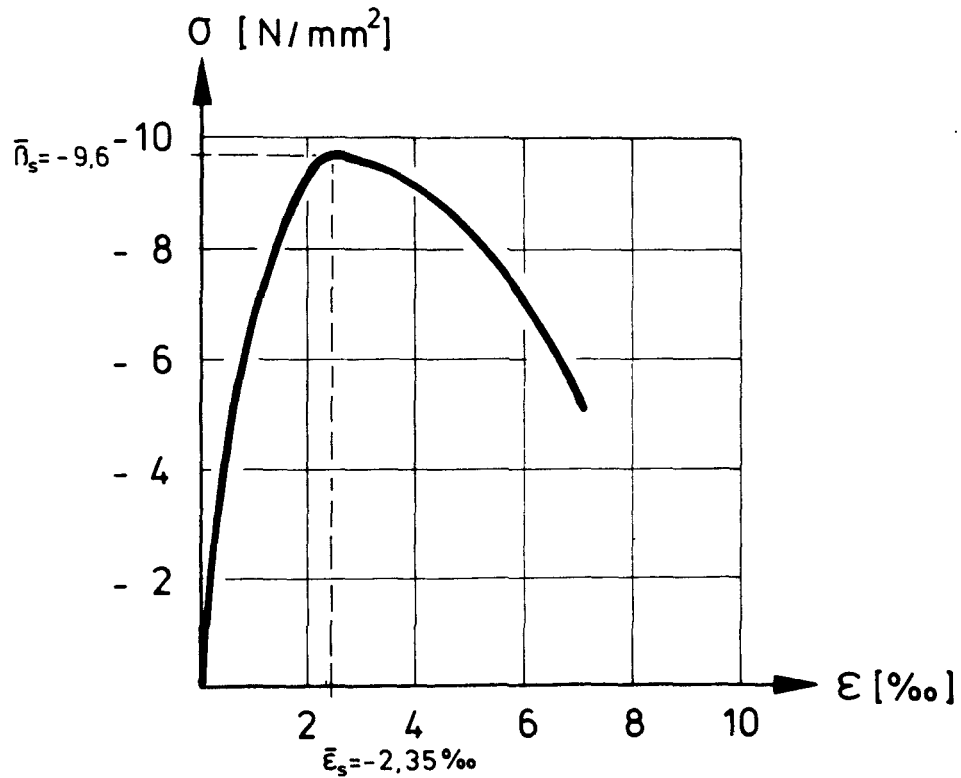
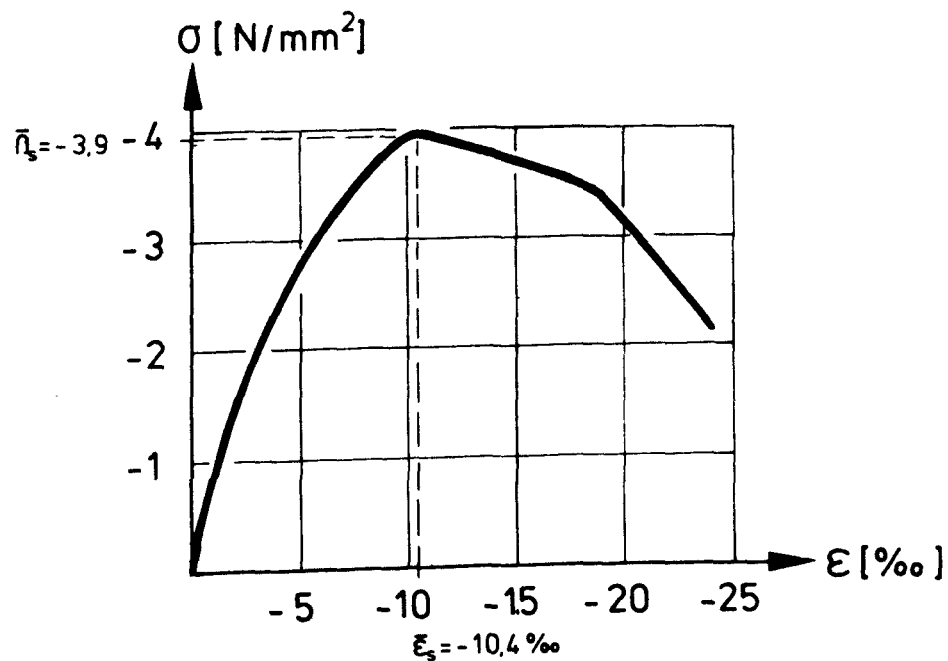


Bild 09: Spannungs-Dehnungs-Linie Mauerwerkstyp C für mittige Belastung



5. Rechnerische Überprüfung der Versuchsergebnisse

5.1 Lastverteilung

Zur Ermittlung der Biegebeanspruchung im Pfeiler sind Kenntnisse über Lastgröße und -verteilung nötig. Die Gesamtlast ist bekannt: Sie wurde über den Druckkissendruck und auch über die Zugstangendehnung bestimmt (Abschnitt 2.3). Für die weitere Auswertung wird von den Horizontallasten, die mit Hilfe der Zugstangen gemessen wurden, ausgegangen. Die Verteilung der Lasten über die Trägerhöhe läßt sich im oberen Lastbereich nach Überwinden der Anspannung (vgl. Bild 4 und Tab.2) zutreffend angeben, das Verhältnis von Randlast zu Mittenlast wird durch den Wert FA beschrieben (Bild 11). Mit diesen Werten können Biegebeanspruchungen am statisch bestimmten System ermittelt werden.

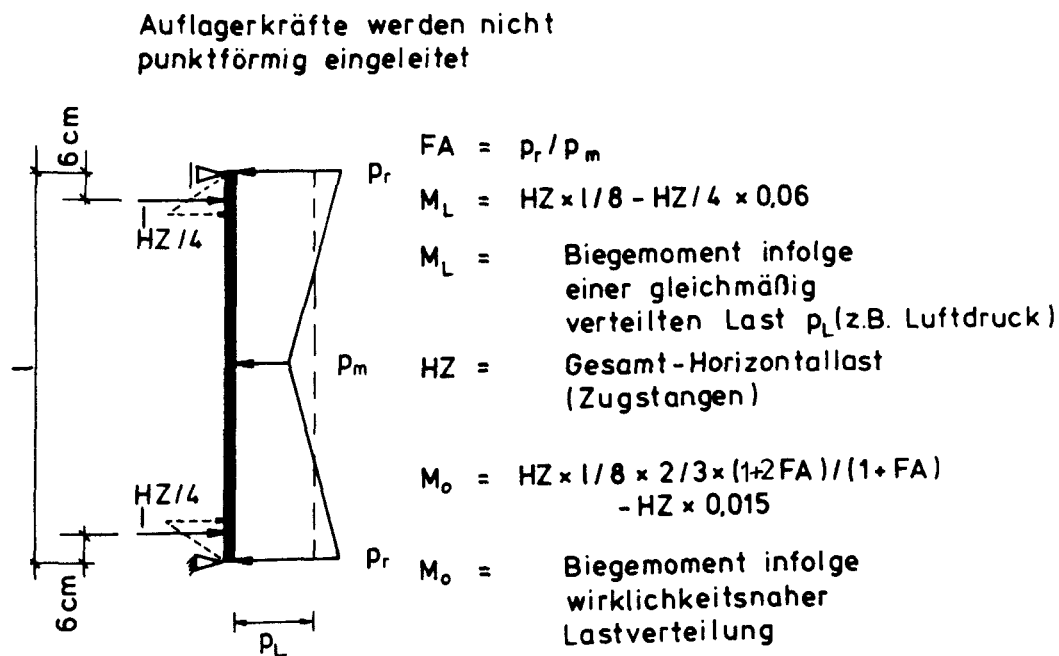


Bild 11: Schnittgrößen am statisch bestimmten System

5.2 Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen

5.2.1 Tragmodell

Körper ohne Zugfestigkeit sind nur dann in der Lage, Biegebeanspruchungen aufzunehmen, wenn sie zusätzlich durch Druckkräfte beansprucht werden. Mauerwerk, senkrecht zu den Lagerfugen beansprucht, ist ein solcher Baustoff. Mauerwerkspfeiler können also nur dann die durch Horizontalbelastung hervorgerufene Biegebeanspruchung ertragen, wenn sie zusätzlich in senkrechter Richtung belastet werden.

Bei den untersuchten Mauerwerkspfeilern handelt es sich um in Wandscheibenebene unverschieblich gelagerte Baukörper, die im ursprünglichen, horizontal unbelasteten Zustand in senkrechter Richtung nur verhältnismäßig gering belastet sind (schraffierter Bereich im Bild 12); nach Einbau der Meßzellen liegt sogar ein Zustand nahezu vollständiger Entlastung vor (vgl. Abschnitt 2.2).

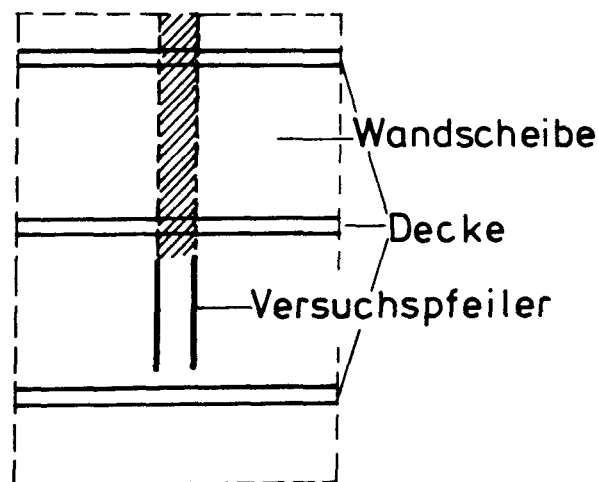


Bild 12: Wandscheibe mit Versuchspfeiler

Unter horizontaler Belastung biegt sich der zu untersuchende Wandpfeiler in Lastrichtung durch. Durch das Aufklaffen der Lagerfugen hat er gleichzeitig das Bestreben, sich in vertikaler Richtung zu dehnen. Diese Verformung wird jedoch durch die in senkrechter Richtung ein unverschiebliches Lager bildenden Sohl- und Deckenscheiben verhindert. Dadurch entstehen Zwangs-

Hierin wird deutlich, daß die aufnehmbare Horizontalkraft und somit das aufnehmbare Biegemoment durch die Normalkraft und den (Bogen-) Stich f bestimmt wird.

Werden die Horizontalverformungen des Pfeilers berücksichtigt, (Theorie 2. Ordnung), verringert sich der Druckbogenstich f um den Betrag der Durchbiegung w , die Gleichung für das aufnehmbare Biegemoment am statisch bestimmten Ersatzsystem lautet dann:

$$M_{0,u}^{II} = N (f - w).$$

In den Versuchen an den Mauerwerkstypen C und D wurden die Horizontallast (und somit das belastende Moment M_0 nach Bild 25) und neben der Normalkraft N die Mittendurchbiegung w gemessen. Ist der Stich f am unverformten System bekannt, läßt sich eine Aussage über das aufnehmbare Moment $M_{0,u}^{II}$ treffen. Es muß gelten:

$$M_0 \stackrel{!}{=} M_{0,u}^{II}$$

Wie groß kann der Stich f nun günstigstenfalls werden? Angenommen, die maximale Druckfestigkeit des Mauerwerks wird am Druckrand (Bild 15) erreicht (was sicherlich nur für Laststufen in Nähe der Bruchlast gilt), ergibt sich unter Annahme einer linearen Spannungsverteilung:

$$\max f_1 = d - \frac{4}{3} \frac{N_u}{\beta_s \cdot b}$$

unter Annahme eines Spannungsblocks:

$$\max f_2 = d - \frac{N_u}{\beta_s \cdot b}$$

Mauerwerkstyp C: $\beta_s = 13,9 \text{ N/m}^2$ (gemäß Bild 19)

$$N_u = \max N = 100,0 \text{ kN}$$

$$\max f_1 = 0,12 - \frac{4}{3} \cdot \frac{0,100}{13,9 \cdot 0,60} = 0,104 \text{ m}$$

$$\max f_2 = 0,12 - \frac{0,100}{13,9 \cdot 0,60} = 0,108 \text{ m}$$

Mauerwerkstyp D: $\beta_s = 5,0 \text{ N/m}^2$ (gemäß Bild 19)

$$N_u = \max N = 151,1 \text{ kN}$$

$$\max f_1 = 0,25 - \frac{4}{3} \cdot \frac{0,151}{5,0 \cdot 0,60} = 0,183 \text{ m}$$

$$\max f_2 = 0,25 - \frac{0,151}{4,4 \cdot 0,60} = 0,200 \text{ m}$$

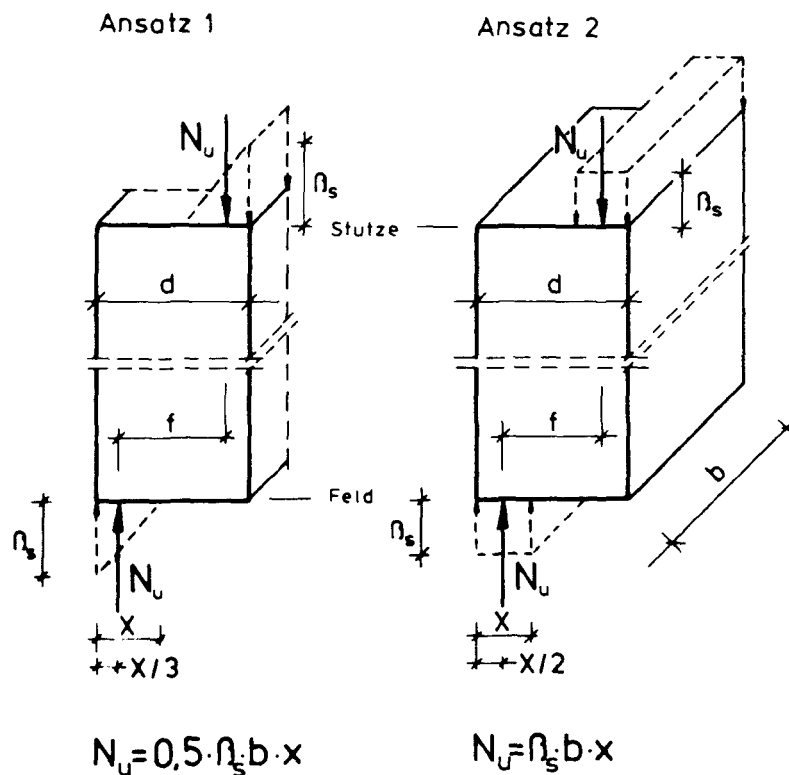


Bild 15: Grenzfälle der Spannungsverteilung

Aufgrund der extrem verschiedenen Annahmen über den Verlauf der Spannungen in der Druckzone des Mauerwerkspfeilers ergeben sich auch Unterschiede in der Größe der Traglasten des Prüfpfeilers. Diese Traglastunterschiede sind aber verhältnismäßig gering, sofern, wie hier, die Durchbiegungen des Wandpfeilers bekannt sind und in der Abschätzung berücksichtigt werden können. Zur Vereinfachung der nun folgenden Berechnungen zur Gleichgewichtsüberprüfung wird daher nicht von der exakten Schwerpunktslage der resultierenden Druckkraft ausgegangen, sondern von folgendem Ansatz zur Ermittlung der rechnerischen Größe des Bogenstiches f_R :

$$f_R = (\max f_1 + \max f_2) \cdot 0,5$$

$$f_R = d - 1,15 \cdot N / (\beta_s \cdot b)$$

In den Tabellen 9 bis 11 sind die belastenden Momente M_o den aufnehmbaren Momenten $M_R (\equiv M_{o,u}^{II})$ gegenübergestellt. In den Annahmen zur Ermittlung des Bogenstiches f_R wird dabei eine volle Umlagerung der Momente vorausgesetzt; im Feld und über der Stütze wird jeweils die maximale Traglast des Querschnitts angesetzt. Reserven durch Momentenumlagerung sind daher in dem rechnerisch maximal aufnehmbaren Moment M_R nicht vorhanden.

Unter Zuhilfenahme der vereinfachenden Berechnung des Bogenstiches f_R und der Bestimmung von $M_{o,u}^{II}$ in Verbindung mit den Werten der Tabellen 9 bis 11 konnte dann die Tabelle 5 erstellt werden. Darin erkennt man, daß bei der Ermittlung der Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung eine Erhöhung der Zustandsgrößen zu verzeichnen ist. Dies hängt bei diesen Untersuchungen aber ausschließlich mit der Aktivierung von Normalkräften aus den Nachbarbereichen des Pfeilers infolge seiner vertikalen Spreizung im Bruchzustand zusammen. Mit Hilfe der Werte der Spalte 11 sollte dieser Sachverhalt zunächst mit einer Lastausbreitung von 30° über dem Deckenaufleger angenähert werden. Nach erfolgtem Einbau der Kraftmeßstellen wird diese Näherung überflüssig.

Bemerkungen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Nr. ⁴⁾	d	P_L	max w	M_F^I	M_{St}^I	N^I	M_F^{II}	M_{St}^{II}	N^{II}	$N_{30^\circ}^{5)}$	$P_{L,R}$
		cm	bar	cm	kNm/m		kNm/m	kNm/m		kN/m	kN/m	bar
Vorversuche	A1	24,5	1,18	2,55	$\pm 29,50$		275,0	$\pm 33,70$		330,0	283	1,05
	B1	38,5	2,68	0,98	80,6	-53,4 ¹⁾	495,0	83,8	-55,2 ¹⁾	520,0	800	3,65
	B2	38,5	3,88	2,38	$\pm 102,00$		665,0	$\pm 111,0$		760,0	815	4,23
Hauptversuche	C1 ⁴⁾	12,0	0,34	4,85 ²⁾	$\pm 7,58$		77,1	$\pm 11,12$		145,7	-	0,25
	C2 ⁴⁾	12,0	0,32	3,60 ³⁾	$\pm 7,25$		75,0	$\pm 10,25$		166,7	-	0,27
	C3 ⁴⁾	12,0	0,26	2,30	$\pm 6,00$		60,1	$\pm 7,49$		129,3	-	0,22
	D1 ⁴⁾	25,0	0,84	4,19	$\pm 19,25$		100,4	$\pm 22,64$		161,8	-	0,73
	D2 ⁴⁾	25,0	0,96	3,90	$\pm 22,00$		120,6	$\pm 26,33$		221,7	-	0,80
	D3 ⁴⁾	25,0	1,03	5,92	$\pm 23,33$		133,5	$\pm 29,70$		215,0	-	0,88
	D4 ⁴⁾	25,0	0,88	2,30	$\pm 20,50$		122,4	$\pm 22,95$		212,8	-	0,76

- d : Pfeilerdicke
 P_L : Luftdruck im Bruchzustand, gemessen
max w : maximale Durchbiegung im Bruchzustand
 M_F : Feldmoment im Bruchzustand
 M_{St} : Stützmoment im Bruchzustand
N : Druckkraft im Bruchzustand
 $N(30^\circ)$: unter einer Lastausbreitung von 30° errechnete Druckkraft im Pfeiler
 $P_{L,R}$: Luftdruck im Bruchzustand, berechnet

- 1) Wanddicke durch Schlitz auf 33 cm reduziert
2) Zeitliche Zugehörigkeit nicht gesichert
3) Aus Durchbiegungsverlauf geschätzt
4) Unter Anrechnung des Putzes ermittelt
5) Für die Pfeiler der Serien C und D entfällt diese Berechnung (Bestimmung von N mit Meßzellen)

Tabelle 5: Aufnehmbare Schnittgrößen der Pfeiler A - D

5.2.2 Diskussion der Berechnungsergebnisse

In den Bildern 16 und 17 ist der Zusammenhang zwischen den gemessenen Normalkräften im Mauerwerkspfeiler und Biegemomenten unterschiedlicher Ermittlungsart unter Verwendung der Zahlenwerte der Tabellen 9 bis 11 graphisch dargestellt. Zum einen wurden Biegemomente M_0 aus der wirklichkeitsnahen Verteilung des Luftkissendruckes und zum anderen Momente M_R (errechnet aus den Druckbogenstichen f_R und der Durchbiegung w) mit den gemessenen Normalkräften in Beziehung gesetzt. Dabei wurde der Einfluß des Putzes auf die Größe von M_R graphisch durch zwei verschiedene Kurven berücksichtigt. Zusätzlich gestattet die Kennlinie des Pfeilers C3 einen direkten Vergleich mit dem verputzten Mauerwerkspfeiler.

Es fällt auf, daß die Bruchmomente der Versuchspfeiler mit Putz (C1, C2) deutlich größer sind (8,9 / 8,7 kNm) als das Bruchmoment am Pfeiler ohne Putz (C3 - 7,2 kNm). Es ist daher zu vermuten, daß sich der Putz an der Lastabtragung beteiligt, was auch einleuchtet: im Bereich der maximalen Biegemomente erhält der Pfeiler jeweils auf der Druckseite Querdruck (Feld-Druckkissen; Stütze-Quertraversen), der den Verbund zwischen Mauerwerk und Putz erheblich verbessert. Die Gesamtdicke der Pfeiler einschließlich Putz schwankt zwischen 14,0 cm und 15,0 cm, davon bestehen 12,0 cm aus Mauerwerk. Da die Festigkeit des Mauerwerks Typ C relativ hoch liegt (13,9 N/mm²), werden jeweils nur 0,5 cm Putz je Seite als mittragend angesetzt (im Mittel 40 % der Gesamtputzdicke).

Die Abstände zwischen den Kurven gemessener und errechneter Schnittgrößen von verputztem und unverputztem Mauerwerk besitzen etwa die gleiche Größenordnung. Dies macht deutlich, daß die Annahme über die Mitwirkung des Putzes bei der Lastabtragung richtig ist.

Die Auswertung der Gleichgewichtsbedingungen für den Mauerwerkstyp D führt zu ähnlichen Ergebnissen. Auf eine graphische Darstellung wurde in Anbetracht der wenigen Meßwerte verzichtet, vgl. Tabellen 10 und 11.

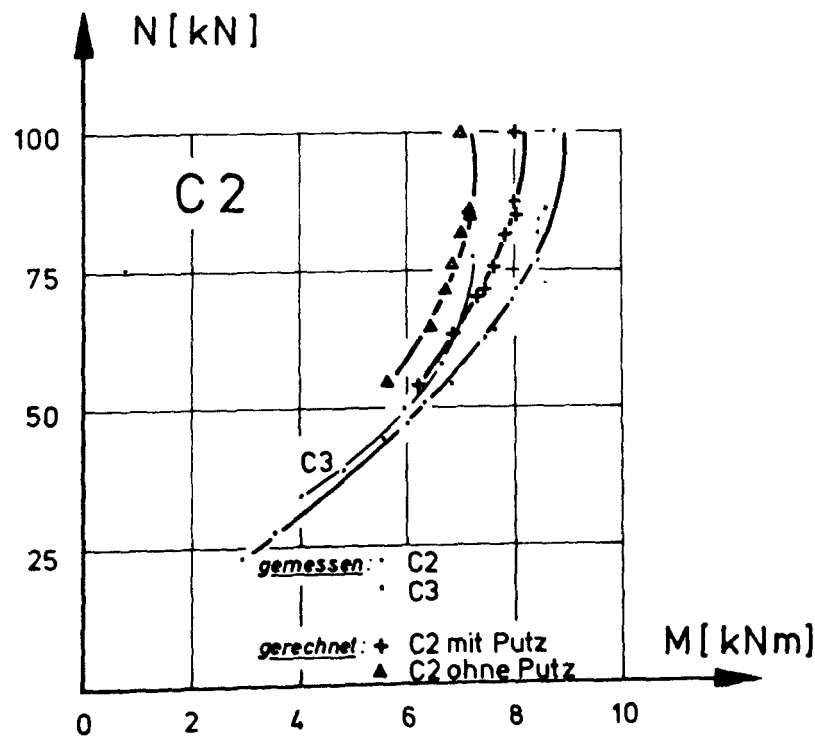
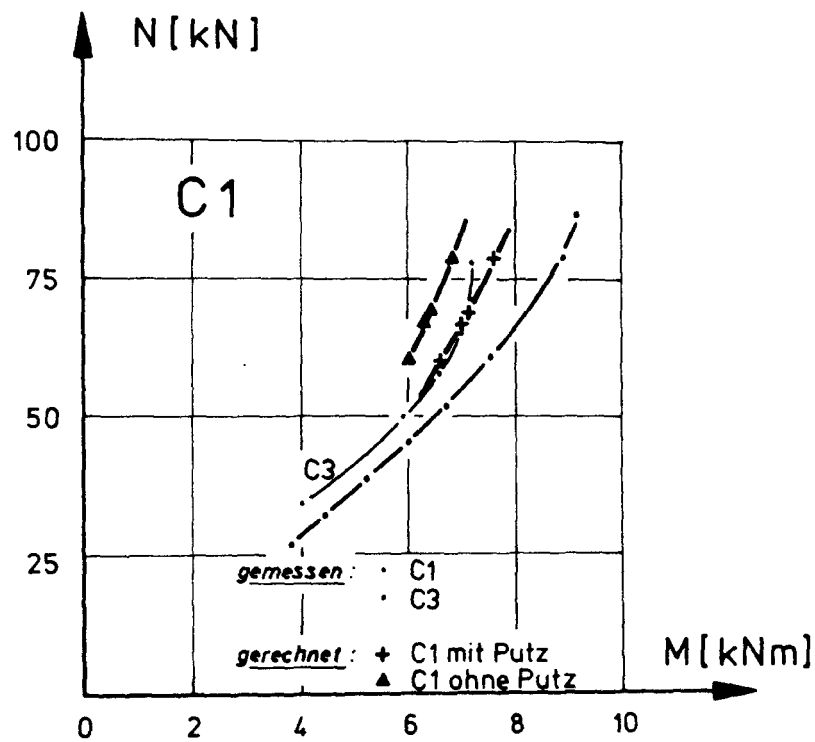


Bild 16 und 17:

Graphische Darstellung der M-N-Beziehungen rechnerisch ermittelter und gemessener Werte für den Mauerwerkstyp C

5.2.3 Beurteilung der Ergebnisse

Unter Annahme eines vollen Momentenausgleichs ergeben sich bei allen Versuchen rechnerisch geringere Traglasten als gemessen wurden. Beim Mauerwerk Typ C betragen die am statischen Ersatzsystem errechneten Biegemomente M_R etwa 90 % der aus den gemessenen Horizontallasten ermittelten Biegemomente M_0 , beim Mauerwerk des Typs D ergeben sich Verhältnisswerte von etwa 93 - 95 %. Dies kann durch folgende Unsicherheiten in den Rechenannahmen geklärt werden.

- Größe der Zugtangensspannung im entlasteten Zustand

Liegt eine Restbeanspruchung im Pfeiler vor, werden die Anspannungswerte für Horizontalkraft und Normalkraft zwangsläufig versuchstechnisch und rechnerisch zu gering ermittelt. "Gemessenes" und errechnetes Biegemoment ergeben sich gleichermaßen als zu klein. In dem Verhältnisswert M_R/M_0 wirkt sich dieser Unsicherheitsfaktor nicht aus und beeinflusst also nicht die Richtigkeit dieses Faktors.

- Mauerwerksdicke

Die Mauerwerksdicken gehen mit 12 bzw. 25 cm (ggf. zuzüglich Putz) in die Zahlenrechnung ein. Die entsprechenden Werte der Nebenversuchskörper streuen allerdings zwischen 11,8 - 12,4 cm bzw. 25,0 - 25,4 cm.

- Vernachlässigung der Zugfestigkeit des Mauerwerks

Zugspannungen im Mauerwerk werden nicht angesetzt; ihr Einfluß ist bei größeren Auflasten auch vernachlässigbar klein (< 1 %).

- Streuung der Biegedruckfestigkeit

Die Biegedruckfestigkeit des Mauerwerkstyps D weist Werte zwischen 4,0 und 6,0 N/mm² auf; in die Berechnung eingeführt wurde 5,0 N/mm². Die Biegedruckfestigkeit des Mauerwerkstyps C wurde nur an einem Prüfkörper untersucht (13,9 N/mm²). Vergleichbare Streuungen sind allerdings auch hier zu vermuten.

- Mehrachsiale Spannungszustände

Im Bereich der maximalen Beanspruchungen wird der Pfeiler in Querrichtung jeweils auf der Druckseite durch Druckspannungen beansprucht; in Feldmitte durch die Druckkissen, über den Stützen durch die Quertraversen. In den am höchsten beanspruchten Druckzonen bildet sich also ein zweiachsialer Spannungszustand aus, der zu einer Erhöhung der maximal aufnehmbaren Spannung β_S führt. Insbesondere bei den Versuchen am Mauerwerkstyp D (höhere Querlasten; geringere Festigkeiten) dürfte dieser Effekt nennenswerten Einfluß auf das errechnete Biegemoment haben.

Hierzu wird folgende Vergleichsrechnung durchgeführt:

$$\begin{aligned} \text{D4} - \text{LST 25} \quad \text{HZ} &= 102,0 \text{ kN} & p &= 1,50 \text{ bar} \\ & N = 124,8 \text{ kN} & w &= 2,00 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\text{Feldmitte: Querdruck} = 150 \text{ kN/m}^2 = 1,5 \text{ bar}$$

$$\sigma_1 / \beta_S = 150 / 5000 = 0,030$$

Unter Annahme ähnlichen Verhaltens von Mauerwerk unter Querdruck, wie Beton ergibt sich mit /8/:

$$\begin{aligned} \beta_{S,Q} &\cong 1,1 \cdot 5,0 = 5,5 \text{ N/mm}^2 \\ \text{FN} &= 0,74; \text{ FM} = 0,59 \text{ gemäß Bild 08} \end{aligned}$$

Abstand der Resultierenden vom Druckrand:

$$a = (1 - 0,59) \cdot 124,8 / (0,74 \cdot 0,60 \cdot 5500) \cong 2,09 \text{ cm}$$

Stütze:

$$\sigma_Q \cong 0,5 \cdot 102,0 / (0,16 \cdot 0,60) = 530 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_Q / \beta_S = 530 / 5000 = 0,106$$

$$\beta_{S,Q} \cong 1,15 \cdot 5000 = 5700 \text{ kN/m}^2 \rightarrow a = 2,02 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} f &= 25 - (2,09 - 2,02) = 20,89 \text{ cm} \\ f - w &= 20,89 - 2,00 = 18,89 \text{ cm} \\ M_R &= 0,1889 \cdot 124,8 = 23,6 \text{ kNm} \\ M_R / M_O &= 23,6 / 23,8 = 99,1 \% \end{aligned}$$

Werden die größte gemessene Mauerwerksdicke (25,4 cm) und die größte gemessene Druckspannung von 6 N/mm² in die Berechnung eingeführt, erhöht sich dieser Wert sogar auf 107 % - ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten im statischen System (Stützweite, Einleitung der Auflagerlasten) und in der Lastverteilung bei der Ermittlung des Biegemoments M_0 .

Die sich auf der Grundlage des in Abschnitt 5.2.1 dargestellten Tragmodells ergebenden Gleichgewichtsbedingungen werden also von den gemessenen Horizontal- und Normalkräften - unter Berücksichtigung der gemessenen Verformungen - mit hinreichender Genauigkeit erfüllt. Die maximalen Querschnitts-Traglasten werden in Pfeilermittle sowie am Pfeilerkopf und -fuß erreicht, was den vollen Ausgleich der Momente verdeutlicht.

Zusammenfassend darf festgestellt werden, daß die zwischen 5 % und 10 % liegende Abweichung zwischen maximaler rechnerischer und gemessener Traglast infolge der Streuung von Meßwerten und durch die schwierige Erfassung der Randbedingungen ein befriedigendes Ergebnis bedeutet.

5.3 Überprüfung der Durchbiegungen

5.3.1 Vereinfachte Spannungs-Dehnungs-Linien

Um die Durchbiegung der Versuchskörper rechnerisch behandeln zu können, ist es zunächst erforderlich, die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen in Abschnitt 4.2 formelmäßig zu erfassen. Der in Bild 18 dargestellte Ansatz aus /3/ ermöglicht neben der Anpassung von Fließbeanspruchung, Fließdehnung und Bruchdehnung durch entsprechende Wahl des Exponenten n im Parabelbereich auch eine zutreffende Beschreibung des Elastizitätsmoduls (Tangente im Ursprung). Hierdurch werden sowohl für die Berechnungen im Gebrauchszustand, wo nur geringe Dehnungen ausgenutzt werden, als auch für Berechnungen im rechnerischen Grenzzustand, in dem große Dehnungen auftreten, mit ein und demselben Typ einer Spannungs-Dehnungs-Linie gleichermaßen gut geeignete Rechengrundlagen formuliert.

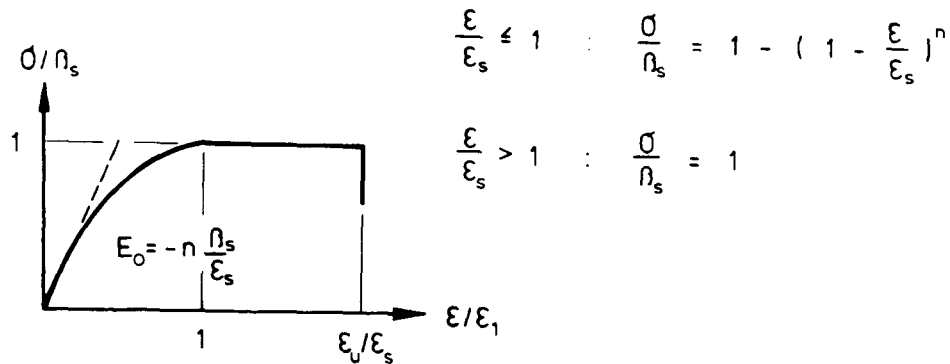


Bild 18: Normierte rechnerische Spannungs-Dehnungs-Linie

Folgende Werte werden in die weitere Berechnung eingeführt:

- β_S die für ausmittig belastete Versuche (Biegedruckzone) ermittelte Biegedruckfestigkeit,
- ϵ_S die für mittig belastete Versuche ermittelte Fließgrenze

Die Form der unter mittiger Belastung ermittelten σ - ϵ -Linien stimmt zumindest näherungsweise mit der unter ausmittiger Belastung bestimmten überein, vgl. Abschnitt 4.2.

- ϵ_u die Stauchung, für die sich die maximale Biegetragfähigkeit (FN · FM) einer Biegedruckzone ergibt (Bilder 07 und 08),
- E_0 der um den Faktor F vergrößerte E-Modul im Ursprung für mittig belastete Versuche, $F = \beta_{S,e} / \beta_S$.

Es ergeben sich so die in Bild 19 dargestellten σ - ϵ -Linien für die vorwiegende Beanspruchung auf Biegung.

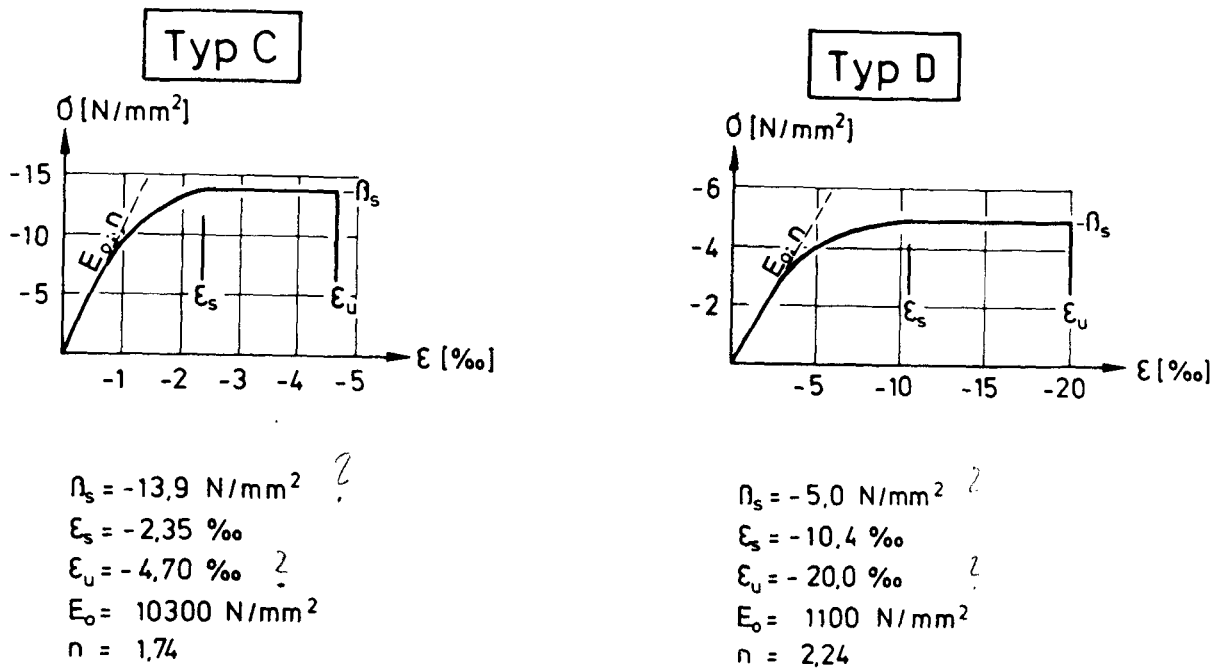


Bild 19: Spannungs-Dehnungs-Linien für Biegedruckzonen

5.3.2 Zusammenhang zwischen Moment, Normalkraft und Krümmung

Auf der Grundlage der Spannungs-Dehnungs-Linien für die einzelnen Mauerwerkstypen lassen sich Momenten-Normalkraft-Beziehungen (m-n-Diagramme) angeben. Diese sind in den Bildern 20 bis 22 graphisch dargestellt; dabei wurde die bei Mauerwerk immer fragwürdige Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen nicht berücksichtigt.

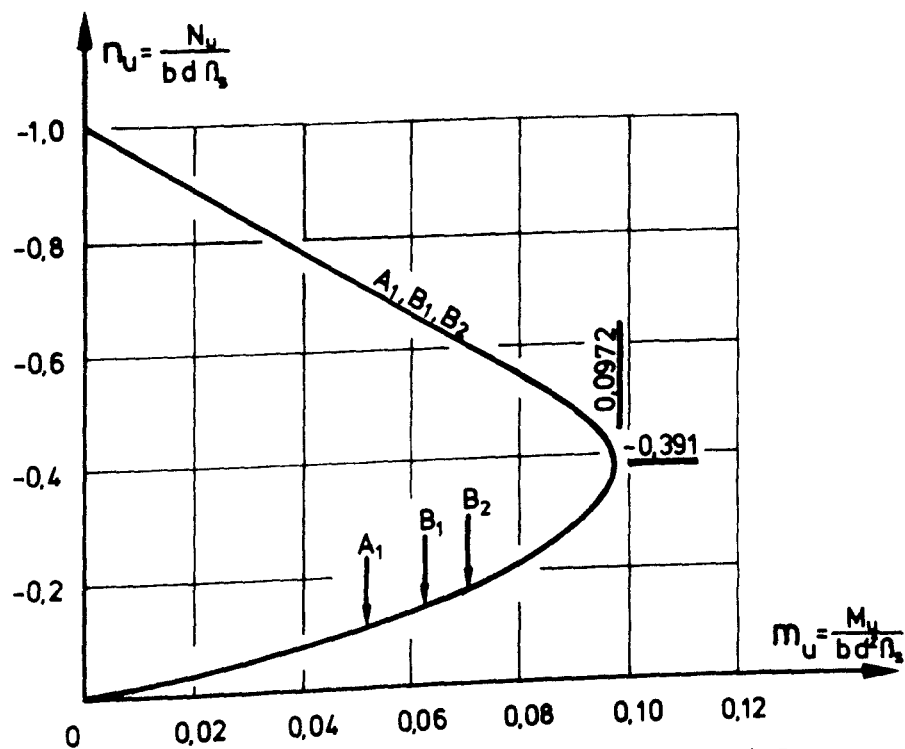


Bild 20: m-n-Diagramm der Mauerwerkstypen A und B

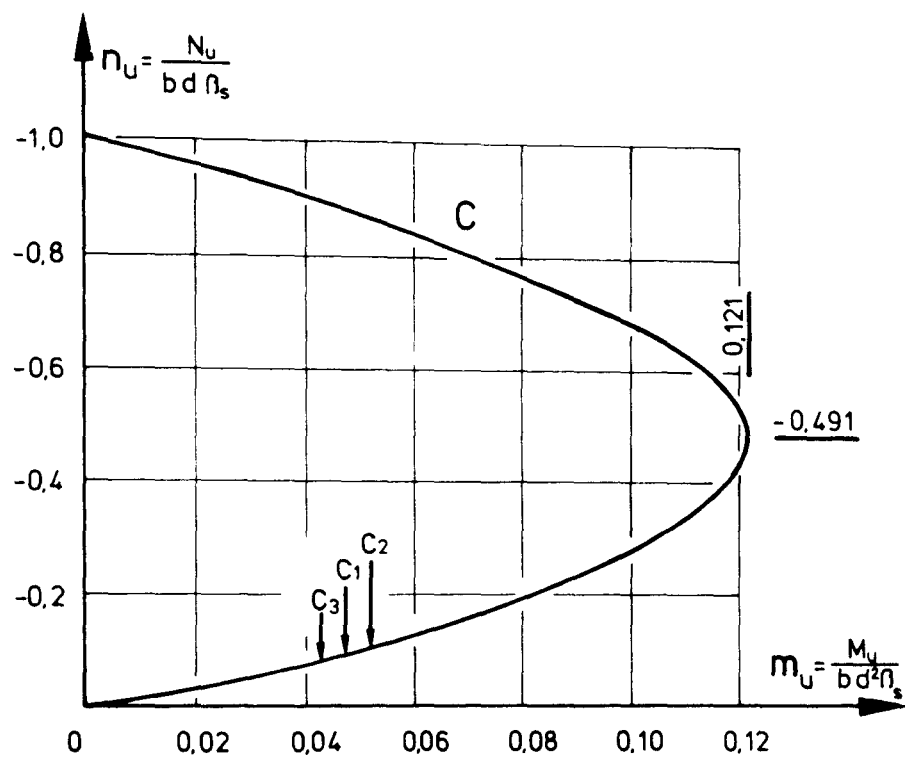


Bild 21: m-n-Diagramm für Mauerwerk Typ C

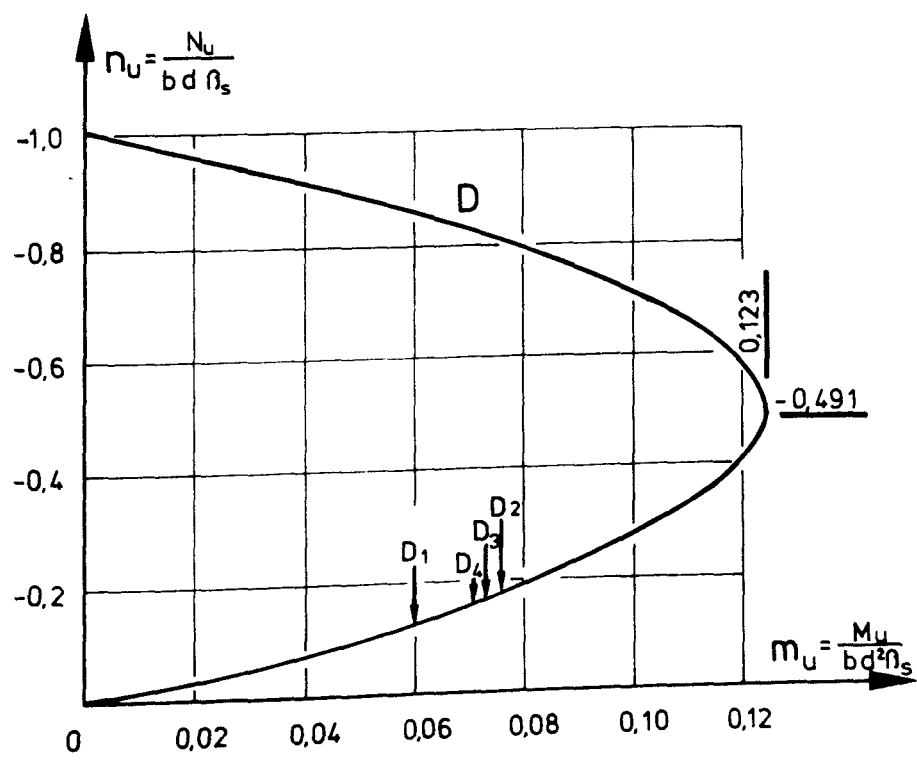


Bild 22: m-n-Diagramm für Mauerwerk Typ D

Man erkennt, daß die Tragkraft in den durchgeführten Versuchen keineswegs ausgeschöpft wurde und bei höheren Auflasten auch noch größere Biegemomente, d.h. eine größere Tragfähigkeit gegen horizontale Druckbeanspruchung, hätte aufgenommen werden können.

Um mögliche gemeinsame Eigenschaften der verschiedenen Mauerwerkstypen aufzeigen zu können, werden im Bild 23 alle m-n-Linien in einem Diagramm dargestellt.

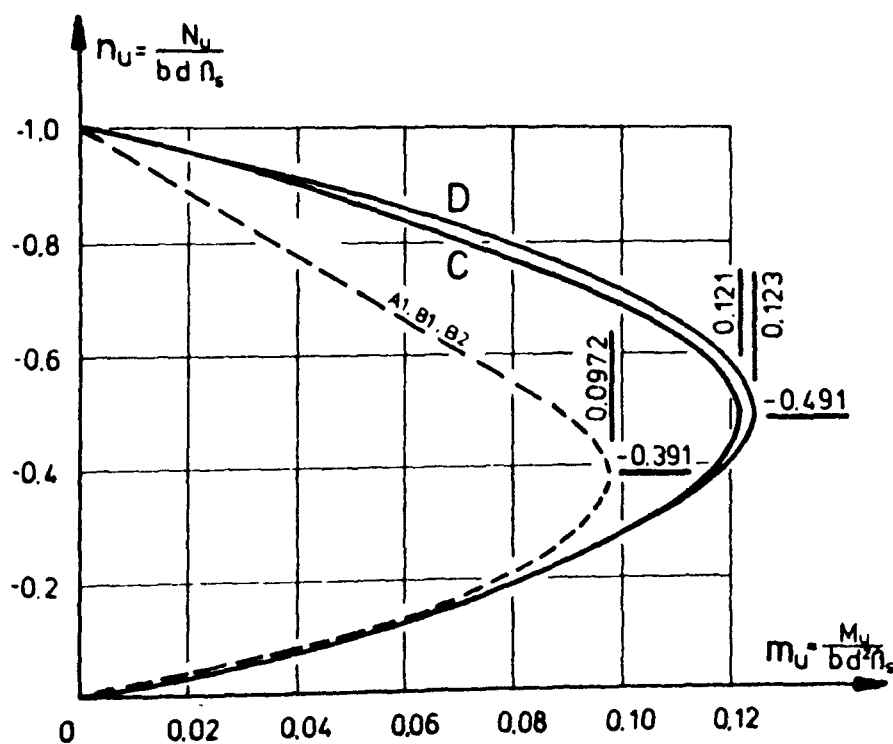


Bild 23: m-n-Diagramme der untersuchten Mauerwerkstypen

Unterschiede zwischen den Mauerwerkstypen C und D sind lediglich im Bereich sehr hoher Normalkraft oberhalb des sog. Balance-Point erkennbar. Dieser Bereich ist baupraktisch nicht von Bedeutung. Die Kennlinie der Mauerwerkstypen A und B weist mit denen der Typen C und D einen gemeinsamen Bereich aus. Ein Umstand, der bei späteren Betrachtungen berücksichtigt wird.

In diesem Diagramm sind Grenzzustände dargestellt: maximal aufnehmbares Biegemoment eines Querschnittes zu einer vorgegebenen Normalkraft. Die Grenzzustände der Tragfähigkeit werden jedoch erst bei großen Krümmungen - und somit in der Regel erst bei großen Verformungen - erreicht. Hierzu sei auf Bild 1 in /3/ verwiesen, welches zwar das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen beschreibt, prinzipiell aber auch auf Mauerwerk übertragbar ist.

Aufgrund der Verknüpfung von Normalkraft und Biegemoment läßt sich diejenige Normalkraft im Pfeiler bestimmen, die erforderlich ist, um das für den Bruchzustand ermittelte Biegemoment aufnehmen zu können. Allerdings sind hierbei die Biegeverformungen zu berücksichtigen, also die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung zu berechnen. Diese Schnittgrößen sind bereits in Abschnitt 5.2.1 ermittelt und dort in der Tabelle 5 für die verschiedenen Wandpfeiler zusammengestellt worden.

Das Verformungsverhalten von Baustoffen unterhalb der Grenzzustände wird von Momenten-Krümmungs-Diagrammen beschrieben, die für die oben bestimmten σ - ϵ -Linien prinzipiell die in Bild 24 dargestellte Form haben; sie weisen einen großen plastischen Bereich auf; d.h. bei wachsender Krümmung ändert sich das aufnehmbare Moment - unter konstant gehaltener Normalkraft - nur noch unwesentlich.

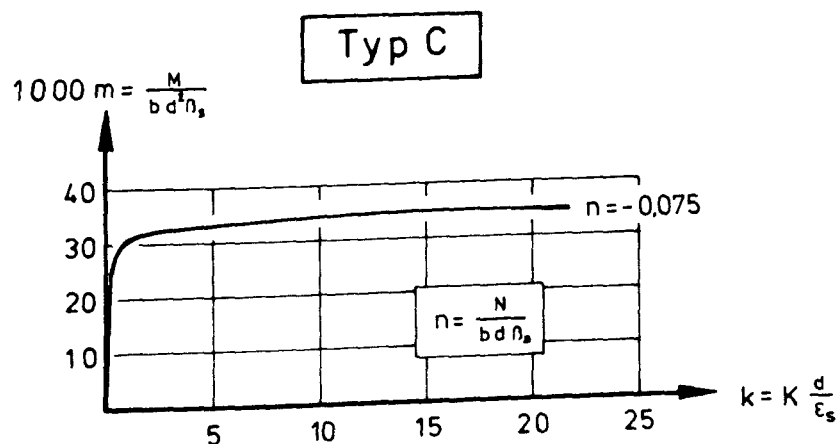


Bild 24: Form der Momenten-Krümmungs-Linie für Mauerwerkstyp C

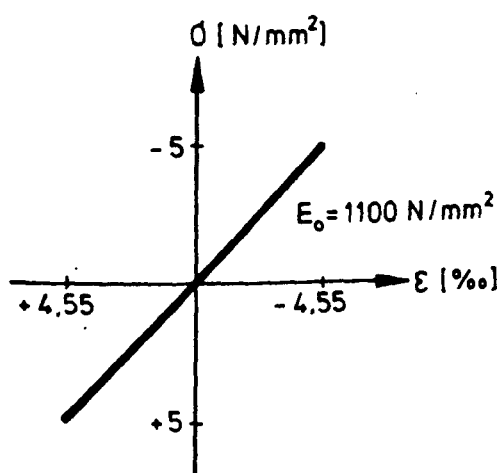
Wertet man die m-k-Beziehung nicht mit Hilfe von geeigneten Rechenprogrammen aus, um sie dann weiter für die Durchbiegungsrechnung eines Mauerwerkspfeilers zu verwenden, empfiehlt es sich, als weitere Arbeitsgrundlage ein Diagramm mit logarithmischer Teilung der Abszisse zu wählen. Hieraus ließe sich dann für die Auswertung eine genauere Momentenzuordnung insbesondere in dem langen, überwiegend plastischen Bereich erreichen.

5.3.3 Nachrechnung der gemessenen Durchbiegungen

Die Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen hat ergeben, daß in allen Versuchen die Tragsmomente der Querschnitte sowohl in Pfeilermitte als auch an Pfeilerkopf und -fuß erreicht wurden (volle Umlagerung der Momente). Mit dieser Momentenverteilung können nun unter Zugrundelegung der Momenten-Krümmungs-Beziehungen die Mittendurchbiegungen bestimmt werden.

Zuvor sollen jedoch am Beispiel des Wandpfeilers D1 die Auswirkungen verschiedener Ansätze für den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie auf die Mittendurchbiegung gezeigt werden.

I : Lineare Spannungs-Dehnungs-Linie mit Zugfestigkeit



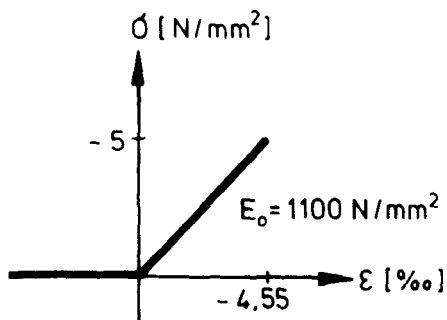
$$\begin{aligned} M_u &= 12,0 \text{ kNm}^* \\ EI &= 1100 \times 0,598 \times 0,25^3 / 12 \\ &= 0,857 \text{ MNm} \hat{=} 857 \text{ kNm} \\ w &= 12,0 \times 2,01^2 / (12 \times 857) \hat{=} 4,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

*) Der Vergleichbarkeit halber wird das Querschnittstragsmoment der linearen Spannungs-Dehnungs-Linie ohne Zugfestigkeit angesetzt.

II : Lineare Spannungs-Dehnungs-Linie ohne Zugfestigkeit

$$M_u = +12,0 \text{ kNm}$$

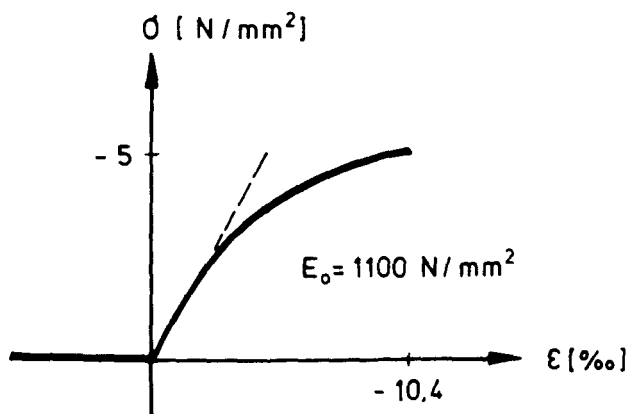
$$w = 12,8 \text{ mm}$$



III : Gekrümmte Spannungs-Dehnungs-Linie ohne plastischen Verformungsbereich

$$M_u = +12,4 \text{ kNm}$$

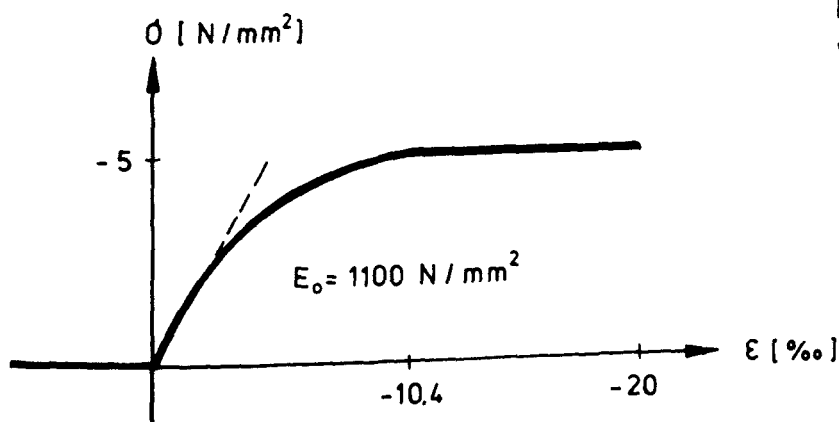
$$w = 29,4 \text{ mm}$$



IV : Gekrümmte Spannungs-Dehnungs-Linie mit plastischem Verformungsbereich

$$M_u = +12,6 \text{ kNm}$$

$$w = 43,3 \text{ mm}$$



Die im Versuch gemessene Mittendurchbiegung betrug 41,9 mm.
Die Nachrechnung auf Grundlage der Elastizitätstheorie (Annahme I) liefert unzutreffende Ergebnisse; wird keine Zugfestigkeit des Querschnitts angesetzt (Annahme II), verbessert sich das

Ergebnis. Die beste Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung ergibt sich unter Zugrundelegung der an die gemessene Spannungs-Dehnungs-Linie angepaßten Beziehung (Annahme IV), ein Indiz für die Überschreitung der Fließgrenze in Bereichen maximaler Biegebeanspruchung.

Die sich aus der Nachrechnung mit Ansatz IV ergebenden Dehnungs- und Krümmungsverhältnisse im Pfeiler sind in Bild 25 dargestellt.

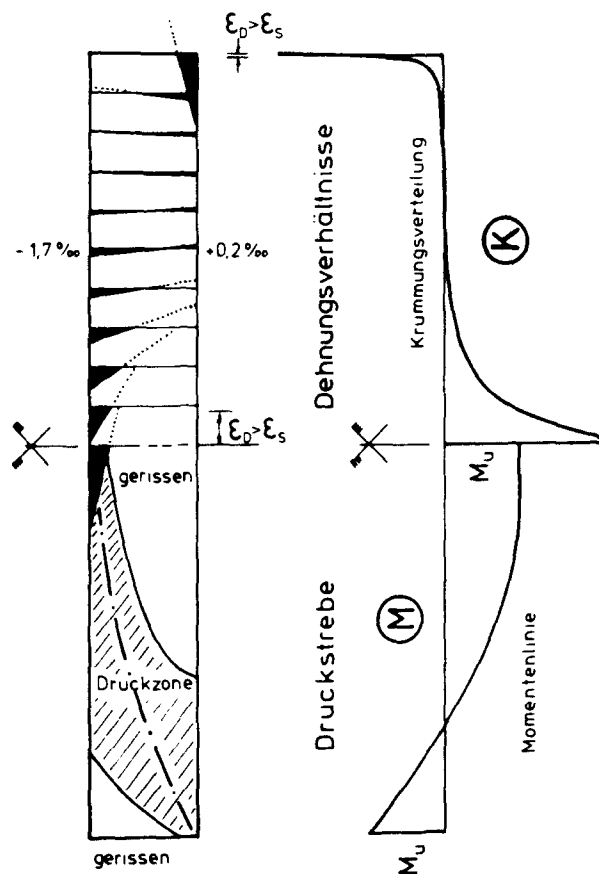


Bild 25: Dehnungsverlauf im Pfeiler D1

In Tabelle 6 werden die Mittendurchbiegungen nach den Ansätzen III und IV den gemessenen gegenübergestellt. Mit Ausnahme von Pfeiler D4 liegen alle gemessenen Durchbiegungen über denen, die mit Ansatz III ermittelt wurden, z.T. sogar über denen nach Ansatz IV. Mit Erreichen des plastischen, also zeitabhängigen Bereichs (Ansatz III) werden die Versuchskörper sehr weich und zeigen kaum noch Widerstand gegen eine weitere Lasterhöhung, wodurch die verhältnismäßig große Streuung der maximalen Ausbiegungen zu erklären ist.

Zum Mauerwerkspfeiler D4 ist zu bemerken, daß der Bruch plötzlich - unter starker Zunahme der Durchbiegung im unteren Viertelpunkt - schlagartig erfolgte. Dies läßt auf ein vorzeitiges Versagen infolge einer Fehlstelle schließen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß sich die Grenzverformungen der Mauerwerkspfeiler mit einer Spannungs-Dehnungs-Beziehung nach Ansatz IV unter Ansatz eines vollen Momentenausgleichs mit befriedigender Genauigkeit berechnen lassen.

Nachrechnung der Durchbiegungen:

Typ	max w (mm)		
	Ansatz IV	Ansatz III	Versuch
C1	27,6	18,5	48,5
C2	25,7	17,2	36,0
C3	30,5	20,4	23,0
D1	43,3	29,7	41,9
D2	39,7	26,1	59,2
D3	37,2	24,5	39,0
D4	42,2	28,0	23,0

Tabelle 6: Vergleich der gemessenen und berechneten Mittendurchbiegungen

6. Vorhersage der Tragfähigkeit von einachsig gespannten Mauerwerkspfeilern

Die Aussagen dieses Abschnitts sind begrenzt auf das Tragverhalten gedrungener Pfeiler, deren Bruch durch Querschnittsversagen eingeleitet wird. Für schlanke Bauteile mit Stabilitätsversagen, deren Querschnittstragfähigkeit nicht erreicht wird, eignet sich die hier beschriebene Methode nicht.

Für die Ermittlung der Traglast von Pfeilern unter Querbelastung muß bei dem hier gezeichneten Verfahren neben den Bruchschnittgrößen des Querschnitts auch die Durchbiegung des Pfeilers bekannt sein. Die rechnerische Bestimmung dieser Größen wird im folgenden beschrieben.

6.1 Querschnittstragfähigkeit von Mauerwerk

Zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit von Mauerwerkspfeilern ist die Kenntnis der Druckfestigkeit des Mauerwerks und der Normalkraft erforderlich.

Die Druckfestigkeit des Mauerwerks kann nach Abschnitt 4.2 erfaßt werden. Die Bestimmung der wirkenden Pfeiler-Normalkraft ist hingegen schwieriger:

Bei den in diesem Bericht beschriebenen Versuchen wurden durch die Verformung der Pfeiler Auflasten benachbarter Wandbereiche (Zwängungskräfte) aktiviert. Die Pfeilerdurchbiegungen verursachten daher neben den Traglastminderungen durch Zusatzmomente nach Theorie II. Ordnung auch deutlich überwiegende Traglasterhöhungen infolge vergrößerter Pfeiler-Normalkraft (vgl. m-n-Diagramm, Bild 23). Solche Lastaktivierungen, besonders Traglasterhöhungen, treten jedoch nicht regelmäßig auf: Wird die betrachtete Wand auf voller Länge einer Querbelastung unterworfen, ist das Gewicht der aufgehenden Konstruktion, bestehend aus Wand- und Deckenlasten, auf die gesamte Wandlänge zu verteilen und der Berechnung zugrunde zu legen.

Zusätzliche Auflasten werden durch die Wandverformungen im Regelfall nicht aktiviert. Lediglich bei einem Angriff von Einzellasten oder Lastkonzentrationen sind zusätzliche Normalkräfte infolge Zwängung zu erwarten. Unter Luftstoßeinwirkung ist unter Umständen sogar davon auszugehen, daß nicht einmal die Trümmerlast aus den über die Kellerdecke hinausragenden Geschossen als Auflast wirksam bleibt.

Sind Pfeilernormalkraft und Druckfestigkeit des Mauerwerks bekannt, kann mit Hilfe des m-n-Diagramms das Grenzmoment (Bruchmoment) des Querschnitts ermittelt werden. Die Tatsache, daß im Trag- und Verformungsverhalten unterschiedliche Mauerwerkstypen ähnliche Verläufe in baupraktisch interessanten Bereichen des m-n-Diagramms aufweisen, läßt den Schluß zu, daß hierüber allgemeine Eigenschaften von Mauerwerk abzuleiten sind. Genauere Untersuchungen zu dieser Fragestellung müßten noch vorgenommen werden.

6.2 Verformungen und Traglast des zu untersuchenden Pfeilers

Das Last-Verformungs-Verhalten einer Querschnittsfaser wird von der Spannungs-Dehnungs-Linie beschrieben. Damit lassen sich durch Variation der Randdehnungen eines Querschnitts für eine vorgegebene Normalkraft die zugehörigen Momenten-Krümmungs-Beziehungen (M-K-Linie) ermitteln. Sie beschreiben das Verformungsverhalten des gesamten Querschnitts. Bei bekannter Momentenverteilung über die Pfeilerhöhe kann mit der M-K-Linie z.B. über den Reduktionssatz

$$w = \bar{M} \frac{M}{EI} dx \quad \bar{M} \text{ inf. } \bar{P} = 1$$

die Mittendurchbiegung w bestimmt werden.

Der Term $\frac{M}{EI}$ entspricht der Krümmung K , also:

$$w = \int \bar{M} K dx$$

Die Zusatz-Biegemomente aus Theorie II. Ordnung (ΔM^{II}) sind somit bekannt; die Differenz zum Grenzmoment M_u des Querschnitts verbleibt zur Aufnahme der Horizontallasten:

$$M_u = M_{(H\text{-Last})}^I + \Delta M^{II}$$

Mit Hilfe der Darstellungen des Bildes 26 soll nun der Rechengang zur Ermittlung der Pfeilertraglast schematisch vorgestellt werden. Dieser beinhaltet allerdings zwei Näherungen:

- 1.) Das Grenzmoment M_u wird gleichzeitig an der Kopf- und Fußeinspannung sowie in der Feldmitte des Wandsystems erreicht.

Die Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen (s. Abschnitt 5) rechtfertigt diese Annahme. Ursache hierfür ist der große plastische Bereich im M-K-Diagramm.

- 2.) Der parabelförmige Ansatz von M_u setzt ebenfalls einen parabelförmigen Verlauf des Zusatzmomentes nach Theorie II. Ordnung (ΔM^{II}) voraus.

Die tatsächliche Biegelinie des Mauerwerkspfeilers zeigt Gelenkbildungen im Bereich der Kopf- und Fußeinspannungen sowie in Feldmitte. Der Ansatz eines parabelförmigen Verlaufs der Durchbiegungen liegt somit auf der sicheren Seite.

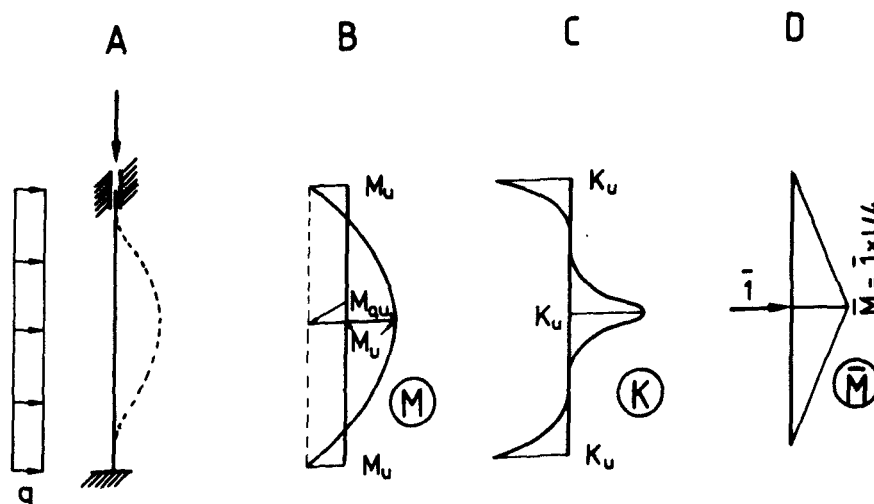


Bild 26: Ermittlung der maximal aufnehmbaren Horizontalbelastung eines Mauerwerkspfeilers

Rechengang zur Ermittlung der Pfeilertraglast bei horizontaler Beanspruchung:

A : Als bekannte Eingangsgrößen der betrachteten Mauerwerkswand stehen zur Verfügung:

- Normalkraft N
- Lagerungsbedingungen
- horizontale Belastungsverteilung q
- σ - ϵ -Linie und damit auch M-N-Diagramm und M-K-Linie

B : Hieraus läßt sich das Grenzmoment M_u des Querschnitts ermitteln. Da dieses Moment in gleicher Größe und zu gleicher Zeit in den Einspannbereichen und in halber Wandhöhe auftritt (voller Momentenausgleich), läßt sich hieraus ein rechnerisches Tragmoment $M_{o,u}$ an einem gedachten, statisch bestimmten Ersatzsystem bestimmen.

$$M_{o,u} = 2 \cdot M_u$$

C : Mit Hilfe des M-K-Diagramms wird der Krümmungsverlauf ermittelt.

D : Über den Reduktionssatz wird die Mittendurchbiegung w der betrachteten Wand bestimmt.

Das Zusatzmoment nach Theorie II. Ordnung M^{II} beträgt nun

$$\Delta M^{II} = N \cdot w$$

Das Tragmoment am $M_{o,u}$ am gedachten, statisch bestimmten Ersatzsystem besteht aus folgenden zwei Anteilen:

$$M_{o,u} = M_o^I + \Delta M^{II}$$

Über das Biegemoment nach Theorie I. Ordnung M_o^I am statisch bestimmten Ersatzsystem

$$M_o^I = M_{o,u} - \Delta M^{II}$$

läßt sich bei bekannter Verteilung der Horizontalbelastung der Wand auch ihre maximal aufnehmbare Last berechnen.

Für eine Wand unter konstantem Horizontaldruck ergibt sich somit eine aufnehmbare Belastung von

$$q = 8 \cdot M_0^I / l^2$$

Durch geringfügige Reduzierung der maximal auftretenden Momente (auf z.B. $0,95 M_u$) verringern sich die errechneten Mittendurchbiegungen deutlich. Es kann sich hierdurch eine gering höhere Traglast ergeben; im Rahmen dieses Näherungsverfahrens ist der Maximalwert maßgebend. Genauere Ergebnisse sind nur durch eine rechnergestützte, verformungsabhängige Rechnung zu erbringen. Mit den vorhandenen Programmen ergeben sich jedoch in der Nähe der Grenzlaster wegen des langen plastischen Bereichs der M-K-Linie Iterationsprobleme.

7. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf zweiachsig gespannte Mauerwerkswände

Die Versuche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden an Mauerwerkspfeilern mit einachsiger Tragrichtung durchgeführt. Die aufgetretenen Pfeilernormalkräfte sind als verhältnismäßig hoch einzuschätzen, so daß mögliche Zugfestigkeiten des Mauerwerks von untergeordneter Bedeutung sind.

Sollen die gefundenen Zusammenhänge zwischen Normalkraft und aufnehmbarer Biegebeanspruchung am einachsigen System auf die wirklichen Verhältnisse einer Mauerwerkswand übertragen werden, ist die traglaststeigernde Wirkung von aussteifenden Bauteilen (i.d.R. Querwände) zu berücksichtigen; die Verhältnisse am Pfeiler entsprechen denen einer (unendlich) langen Wand ohne Aussteifungen. Die durch Aussteifungen erzeugte horizontale Tragwirkung trägt um so größere Anteile der Gesamtlast, je geringer ihr Abstand, genauer, je geringer das Verhältnis von Breite zu Höhe der betrachteten Wand ist.

Mit der rechnerischen Beschreibung dieses Problems haben sich bereits verschiedene Autoren befaßt, ein ausführlicher Vergleich der einzelnen Ansätze findet sich in /7/. Dort wird unter Einbeziehung zahlreicher Versuche festgestellt, daß die Bruchlinientheorie (z.B. /6/) die beste Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung liefert, sofern nur die Eingangswerte (Lagerungsbedingungen, Bruchmomente) hinreichend genau bekannt sind.

Das Bruchmoment des Querschnitts senkrecht zu den Lagerfugen wird im Bereich geringer Normalkraft stark von der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks senkrecht zu den Lagerfugen beeinflusst; aus Versuchen ergab sich, daß der Einfluß der Zugspannungen auf das Bruchmoment jedoch vernachlässigbar wird, sofern die durch die Normalkraft hervorgerufene mittlere Druckspannung etwa 50 % der Biegezugfestigkeit überschreitet /7/. Ist die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen unbekannt, darf sie in guter Näherung wie folgt abgeschätzt werden:

$$\beta_{BZ,y} = 0,02 \cdot \beta_S$$

$\beta_{BZ,y}$: Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

β_S : Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

Für die Lastabtragung in horizontaler Richtung ist bei Wänden das Bruchmoment des Querschnittes parallel zu den Lagerfugen maßgebend. Dieses ergibt sich ausschließlich aus der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks.

$$M_{u,x} = \beta_{BZ,x} \cdot W_x$$

$M_{u,x}$: Bruchmoment parallel zu den Lagerfugen

$\beta_{BZ,x}$: Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

W_x : zu $M_{u,x}$ gehöriges Widerstandsmoment

Senkrecht zu den Lagerfugen wirkende Normalkräfte, z.B. aus Auflasten, erhöhen die Reibung zwischen Mörtel und Stein. Dadurch wird auch der Stein in zunehmendem Maße zur Aufnahme von Biegezugspannungen herangezogen. Dies wird nach /7/ durch den folgenden Ansatz erfaßt.

$$\beta_{BZ,x} = \beta_{BZ,x}^{\circ} + 0,75 \cdot \sigma_y$$

$\beta_{BZ,x}$: Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

$\beta_{BZ,x}^{\circ}$: Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen (anhand von Versuchen ohne Berücksichtigung von Auflasten ermittelt)

σ_y : senkrecht zu den Lagerfugen wirkende mittlere Druckspannung (z.B. aus Auflasten)

Ist die Biegezugfestigkeit ohne Berücksichtigung einer Auflast als Prüfwert unbekannt, darf

$$\beta_{BZ,x}^{\circ} = 3 \cdot \beta_{BZ,y}$$

geschätzt werden /7/.

Inwieweit in der Wand wirkende horizontale Normalkräfte das Bruchmoment $M_{u,x}$ vergrößern, wird nicht weiter verfolgt, weil solche Kräfte im hier interessierenden Bereich nicht als wirksam angesetzt werden können.

Mit den obigen Rechenansätzen können nun die Tragmomente des Querschnittes in beiden Richtungen ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Lagerungsbedingungen des betrachteten Bauteils sind damit alle Voraussetzungen zur Ermittlung der aufnehmbaren Horizontallast gegeben.

Als Beispiel hierfür wird die Nachrechnung der von Dr. Reichenbach /4/ durchgeführten Untersuchungen an statisch horizontal belasteten quadratischen Wänden aus Modellziegelmauerwerk bei Variation der Auflast N vorgestellt. Hierbei wurde eine Lastabtragung in vertikaler und horizontaler Richtung angenommen, wobei für die beiden Tragrichtungen - wie vorstehend erläutert - unterschiedliche Biegezugfestigkeiten eingeführt wurden.

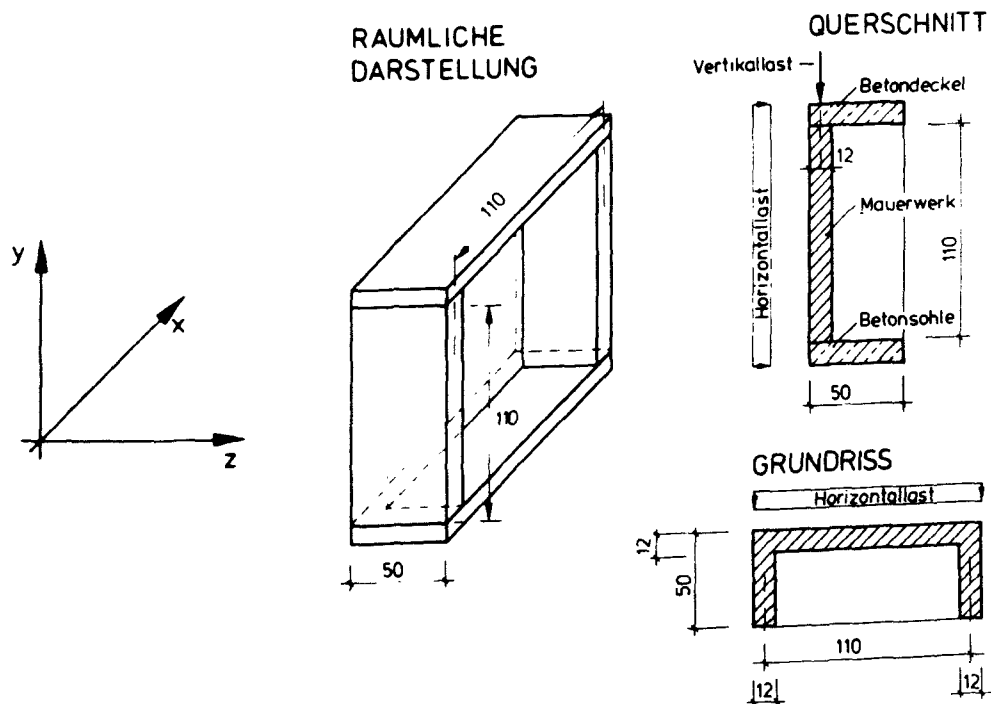


Bild 27: Versuchsaufbau in /4/

Die Versuchswand ist biegesteif an die Seitenwände angeschlossen, diese wiederum sind durch Betondeckel und -boden am Verdrehen um die senkrechte Achse gehindert. Es wird daher angenommen, daß außer im Feldbereich auch an allen vier Rändern die jeweils maßgeblichen, vollen Tragmomente wirksam werden.

In den nun folgenden Ausführungen soll der Rechengang zur Ermittlung der Bruchmomente vorgestellt werden. Zur Verdeutlichung der Beanspruchungsrichtungen wird in Anlehnung an die Platten Theorie die Biegemomentenwirkung wie folgt festgelegt:

M_x = Biegemoment, das in X-Richtung, und damit parallel zu den Lagerfugen, Zugkräfte erzeugt,

M_y = Biegemoment, das in Y-Richtung, und damit senkrecht zu den Lagerfugen, Zugkräfte erzeugt.

a.) Beanspruchung in waagerechter, parallel zu den Lagerfugen wirkender Richtung

Bruchmoment $M_{u,x} = \beta_{BZ,x} \cdot W_x$

Querschnittswerte $W_x = 1 \cdot d^2/6; \quad d = 12 \text{ cm}$

Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ,x} = \beta_{BZ,x}^0 + 0,75 \sigma_y$

Reichenbach verwendet in /5/, S. 30 und 48, einen Biegezugfestigkeitswert von

$$\beta_{BZ,x}^0 = 1,4 \text{ N/mm}^2$$

für ein Versuchskörperalter von 63 Tagen.

Spannung aus
Normalkraft $\sigma_y = N/(b \cdot d)$
 $\sigma_y = N/(1 \cdot 0,12)$

b.) Beanspruchung in vertikaler Richtung, senkrecht zu den Lagerfugen

Das Bruchmoment $M_{u,y}$ kann bei bekannter Normalkraft aus dem M-N-Diagramm des Bildes 23 ermittelt werden. Die rechnerisch nachzuvollziehenden Versuchsergebnisse weisen aber relativ geringe vertikale Auflasten N auf (Tabelle 4 in /4/), so daß hier eine direkte Anwendung der Momenten-Normalkraft-Beziehungen des Bildes 21 zu ungenauen Ergebnissen führen würde. Aus diesem Grunde wird folgende Näherung eingeführt:

Die maximale Auflast N betrug gemäß Tabelle 2 in /4/

$$N_{\max} = 45,8 \text{ kN/m}$$

$$n = N / (b \cdot d \cdot \beta_s) = \sigma_y / \beta_s$$

$$n = -45,8 \cdot 10^{-3} / (1,0 \cdot 0,12 \cdot \beta_s) = -0,382 / \beta_s$$

Unter Berücksichtigung der maximalen Druckfestigkeit des Mauerwerks β_s sind also Werte von

$$n > -0,1$$

zu erwarten.

Der zu $n = -0,1$ gehörige m_u -Wert beträgt

$$m_u = 0,046$$

Die Kurve des Bildes 23 unterhalb dieser Werte soll nun als näherungsweise linear angenommen werden, so daß

$$m_u / n = 0,046 / 0,1 = 0,46$$

beträgt.

Daraus folgt, daß

$$m_u = 0,46 \cdot N / (b \cdot d \cdot \beta_s)$$

ist und das Bruchmoment in diesem Bereich

$$M_u = 0,46 \cdot N \cdot d$$

betragen muß.

Das durch die Mittendurchbiegung der Wand und ihrer Auflast erzeugte Zusatzmoment nach Theorie II. Ordnung

$$\Delta M^{II} = N \cdot w$$

wird vom Feld- und Stützmoment gleichermaßen aufgenommen. Das Bruchmoment wird daher um $M^{II}/2$ verringert:

$$M'_{u,y} = N \cdot 0,46 \cdot d - M^{II}/2$$

$$M'_{u,y} = N \cdot 0,46 \cdot 0,12 - N \cdot w / 2$$

$M'_{u,y}$: Bruchmoment ohne Einbeziehung der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks

Unter Berücksichtigung der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks beträgt $M''_{u,y}$ mit den oben genannten Beziehungen

$$M''_{u,y} = (\sigma_y + \beta_{BZ,y}) \cdot 1 \cdot d^2 / 6$$

$$\beta_{BZ,y} = 1/3 \cdot \beta_{BZ,x}^\circ ; \quad \beta_{BZ,x}^\circ = 1,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta_{BZ,y} = 1/3 \cdot 1,4 = 0,47 \text{ N/mm}^2$$

$M''_{u,y}$: Bruchmoment unter Berücksichtigung der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks

Die sich nunmehr nach der Bruchlinientheorie in Anlehnung an /9/ ergebenden Traglasten sind in Tabelle 7 dargestellt.

Vers.- Nr.	Auflast (kN/m)	Durchbiegung (mm)	$\sigma_{m,y}$ (N/mm ²)	$\beta_{BZ,x}$ (N/mm ²)	$M_{u,x}$	$M'_{u,y}$ (kNm/m)	$M''_{u,y}$	p'	p'' (bar)	P_{Versuch}
1/3	0,0	17,4 / 43,0	0,00	1,40	3,36	0,000	1,128	0,45	0,86	0,73/0,90
5	3,7	6,8	0,23	1,42	3,40	0,192	1,200	0,59	0,88	0,81
6	27,4	9,6	0,23	1,57	3,77	1,381	1,680	0,99	1,06	1,24
2	45,8	7,9	0,38	1,69	4,06	2,347		1,26		1,37

Tabelle 7: Traglasten zweiachsig beanspruchter Mauerwerkswände

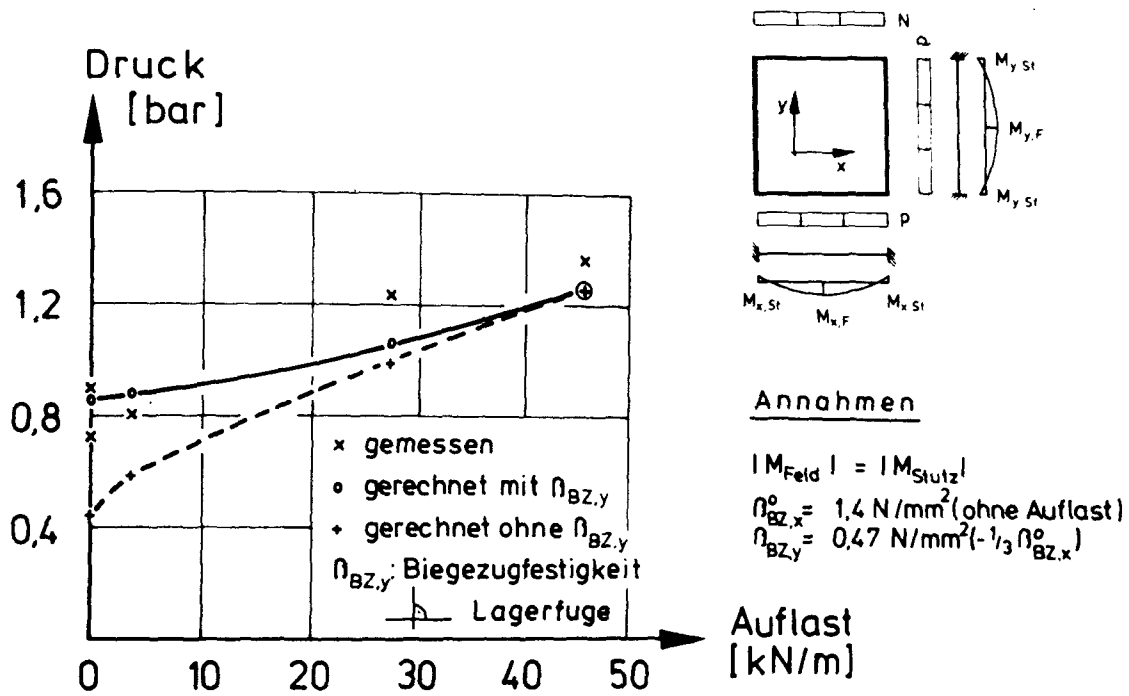


Bild 28: Rechnerische Überprüfung von Versuchsergebnissen an Wänden mit zweiachsiger Lastabtragung nach /4/

Wie Bild 28 ausweist, ist die Übereinstimmung zwischen rechnerischen und gemessenen Traglasten gut, jedoch muß im Bereich geringer Auflast die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen berücksichtigt werden, um das Tragverhalten der Versuchskörper wirklichkeitsnah zu beschreiben.

Um zu zeigen, welche Aussagen mit den durchgeführten Untersuchungen für den Schutzraumbau angestrebt werden und möglich sind, wurde - auf der Grundlage der bisher ermittelten Mauerwerkseigenschaften - die Biegetragfähigkeit von Vollziegelmauerwerk unterschiedlicher Wanddicke in Abhängigkeit von einer geschoßweise abgestuften Auflast berechnet; die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefaßt. Unter Hinweis auf die angegebenen Voraussetzungen (Geometrie und Mauerwerksfestigkeit) kann - vorläufig - geschlossen werden, daß z.B. 24 cm dickes Mauerwerk bei zwei- und mehrgeschossiger Bebauung eine statische Biegetragfähigkeit von mindestens 0,3 bar aufweist, wobei bereits ein Sicherheitsbeiwert von 1,33 enthalten ist. Wird von der Vorstellung ausgegangen, daß eine Druckwelle die Geschosse über Erdgleiche zerstört habe, wäre immer noch zu-

mindest ein Teil der Trümmerlast als Auflast für die hier infrage stehenden Kellerwände als günstig wirksam anzusetzen.

Wand- dicke	keine auf- gehenden Wände	ein- geschossig	zwei- geschossig	drei- geschossig	vier- geschossig
11,5 cm	0,05	0,10	0,14	0,18	0,22
17,5 cm	0,08	0,15	0,23	0,31	0,36
24,0 cm	0,10	0,27	0,40	0,49	0,62
36,5 cm	0,19	0,39	0,56	0,74	0,94

Annahmen: lichte Kellerhöhe: 2,20 m

Druckfestigkeit des Mauerwerks: $\beta_s = 11,2 \text{ N/mm}^2$ (Prüfergebnis)

Lasteinzugsbreite der Decken: 4,0 m

Wanddicken der aufgehenden Wände = Wanddicke der Kellerwand

Tabelle 8: Luftdruck im Bruchzustand in bar von Kellerinnenwänden aus Vollziegelmauerwerk

8. Zusammenfassung

An Mauerwerkswänden von etwa 50 Jahre alten Gebäuden wurden 10 Versuche zur Ermittlung der maximalen Horizontalbelastung durchgeführt. Hierzu wurde jeweils ein Mauerwerkspfeiler freigeschnitten, um eine ausschließlich senkrechte Lastabtragung zu gewährleisten. Es ergaben sich überraschend hohe Traglasten, die nur durch sehr hohe Pfeilernormalkräfte zu erklären sind. Ursache dieser Zwangskräfte ist die Behinderung einer Spreizung des Pfeilers durch die in senkrechter Richtung unverschiebbliche Lagerung. Die hohen Normalkräfte im Pfeiler konnten durch Einbau von Meßelementen in die nachfolgenden Versuchspfeiler auch nachgewiesen werden.

Die Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen im Pfeiler ergab, daß die Querschnittstragmomente sowohl im Feld als auch über der Stütze voll ausgenutzt waren (voller Momentenausgleich). Die hierzu erforderliche Rotationsfähigkeit des Querschnittes konnte anhand von Momenten-Krümmungs-Beziehungen festgestellt werden, die auf der Grundlage von insgesamt elf gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien berechnet wurden. Es zeigte sich, daß auch der abfallende Ast in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Bedeutung für die rechnerische Erfassung des Verformungsverhaltens von Mauerwerk ist. Die in den Versuchen gemessenen Mittendurchbiegungen konnten mit diesen Momenten-Krümmungs-Beziehungen unter der Annahme eines Momentenausgleiches mit befriedigender Genauigkeit rechnerisch nachvollzogen werden.

Soll das Tragvermögen von zweiachsig lastabtragenden Mauerwerkswänden untersucht werden, leistet hierfür die Bruchlinientheorie gute Dienste. Das in diesem Bericht angegebene Tragmodell dient dann zur Bestimmung des Tragmomentes senkrecht zu den Lagerfügen.

In Fortführung dieses Forschungsvorhabens sollen folgende weitere Untersuchungen durchgeführt werden:

- Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Mauerwerkspfählern mit den Eigenschaften alter Bausubstanz unter definierter Auflast,
- Bestimmung von σ - ϵ -Arbeitslinien verschiedenen Mauerwerks unter ausmittiger Belastung,
- Berechnung der Traglasten von Mauerwerkswänden unter Berücksichtigung des Verformungseinflusses und unter angemessenen Auflasten,
- Untersuchung von Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Hochlochziegeln,
- Untersuchung der Schubtragfähigkeit von gedrunenen Pfeilern.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, an Mauerwerksausschnitten die Festigkeits- und Verformungseigenschaften zu ermitteln und aus diesen Ergebnissen durch Berechnung auf die Standsicherheit von altem Mauerwerk bei wandnormaler Belastung unter bauüblichen bzw. im Katastrophenfall nutzbaren Auflasten zu schließen. Weitere Untersuchungen sollten einfache, praxisgerechte Möglichkeiten zur Erhöhung der Schutzwirkung von Mauerwerk gegenüber Strahleneinwirkung und Gasen erschließen.

9. Literaturverzeichnis

- /1/ Furler, R. Tragverhalten von Mauerwerkswänden unter Druck und Biegung.
Birkhäuser Verlag, Basel 1981
- /2/ Kordina, K. Bemessung von schlanken Bauteilen -
Quast, U. Bruchsicherheitsnachweis.
Beton-Kalender 1986, Teil 2, S. 445
- /3/ Quast, U. Zur Mitwirkung des Betons in der Zugzone.
Beton- und Stahlbetonbau 1981, S. 247
- /4/ Reichenbach, H. Untersuchungen über Möglichkeiten zur
Schaffung von Schutzräumen in bestehender
Bausubstanz.
Tätigkeitsbericht der Schutzkommission
beim Minister des Innern für das Jahr
1979
- /5/ Reichenbach, H. Untersuchungen zur Durchführung baulicher
Maßnahmen in bestehender Bausubstanz
gegen dynamische Einwirkungen.
Tätigkeitsbericht der Schutzkommission
beim Minister des Innern für das Jahr
1980
- /6/ Sawcuk, A. Grenzfähigkeits-Theorie der Platten.
Jaeger, T. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/
Heidelberg 1963
- /7/ Schöner, W. Zur Biegetragfähigkeit von Mauerwerk
unter Berücksichtigung axialer Auflasten.
Heft 41 der Mitteilung aus dem Institut
für Baustoffkunde und Materialprüfung
der TU Hannover

- /8/ Wesche, K. Baustoffe für tragende Bauteile.
Teil 2: Beton.
Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1981
- /9/ Kordina, K. Biegetragfähigkeit von Mauerwerk alter
Bausubstanz gegenüber Horizontaldruck.
Vortrag anlässlich der Jahrestagung 1984
der Schutzkommission beim Bundesminister
des Innern

Zahlreiche weitere Aufsätze zu den Themen Verformungsverhalten, Biegetragfähigkeit und Stabilität von Mauerwerk finden sich in den Dokumentationen zu den Internationalen Mauerwerkskonferenzen (IBMAC), die seit 1969 veranstaltet werden.

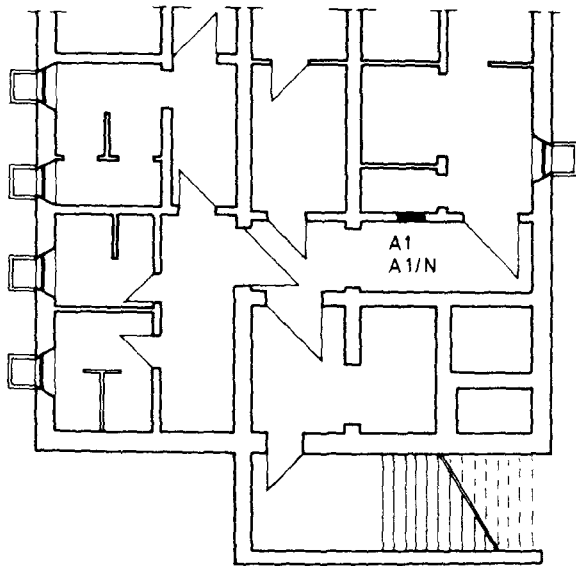
A N H A N G

Z U M A B S C H L U S S B E R I C H T

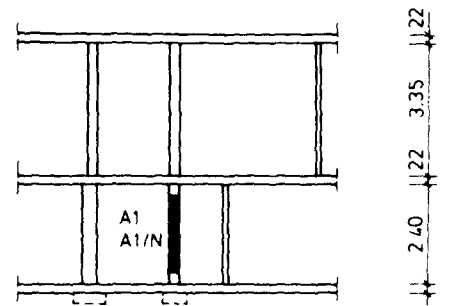
Ü B E R

U N T E R S U C H U N G E N Z U R S T A N D S I C H E R H E I T
V O N W Ä N D E N I N A L T E R B A U S U B S T A N Z
U N T E R H O R I Z O N T A L D R U C K

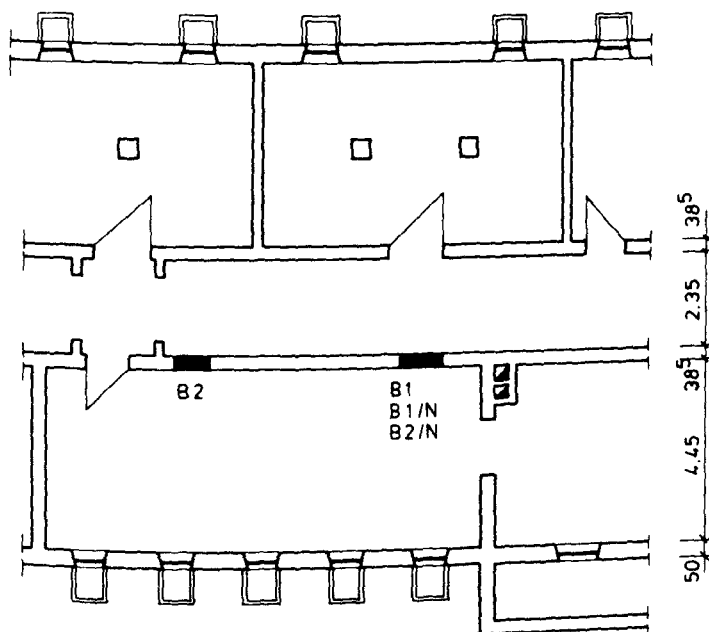
GRUNDRISS KELLER



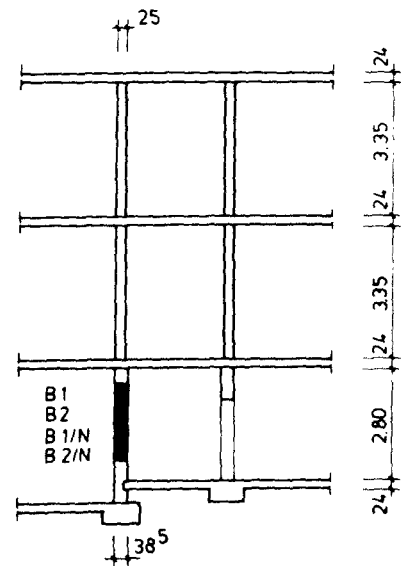
WANDQUERSCHNITT A1



GRUNDRISS KELLER



WANDQUERSCHNITT B1, B2



Hinweis: Die Bezeichnung .../N bezieht sich auf die Versuchskörper für die ergänzenden Untersuchungen

Bild 29: Lage der Versuchswände im 1. Gebäude

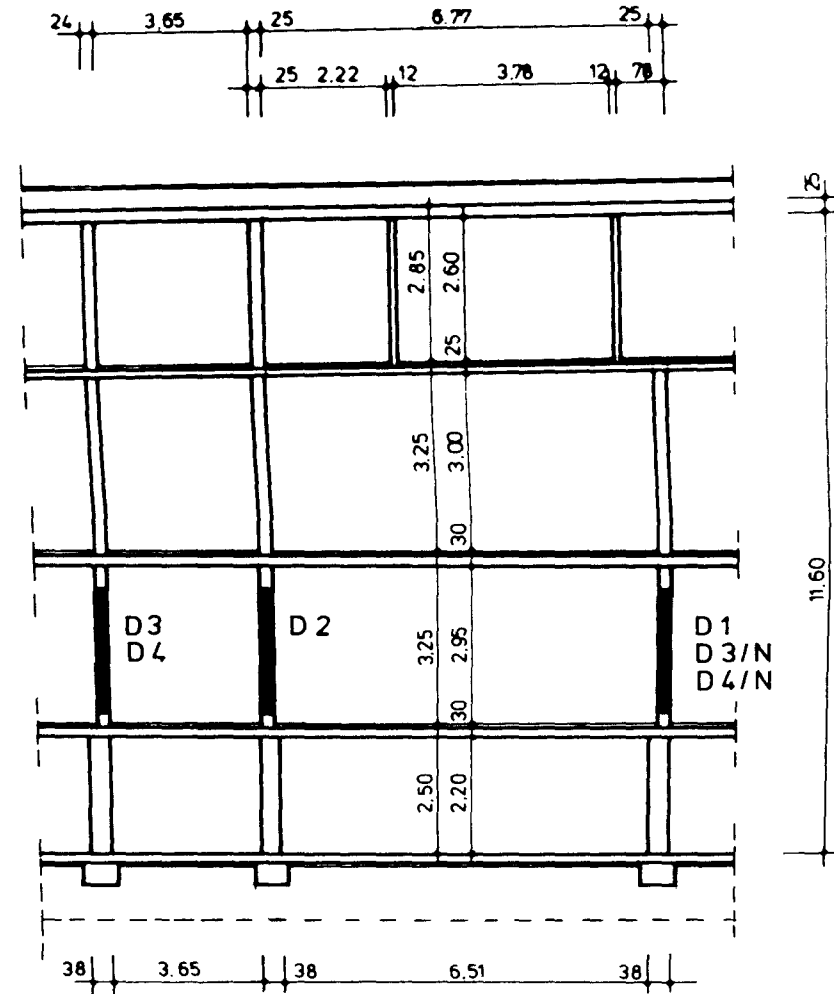
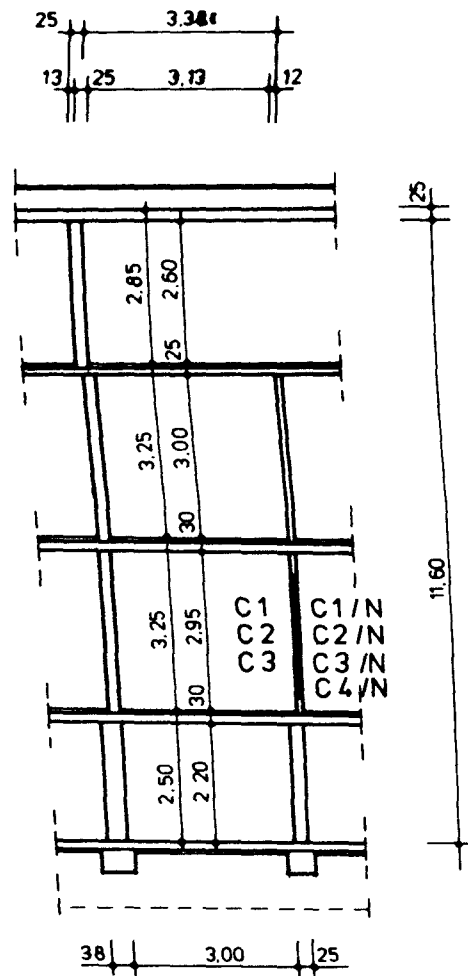


Bild 31: Wandquerschnitte / Versuchspfeiler im 2. Gebäude

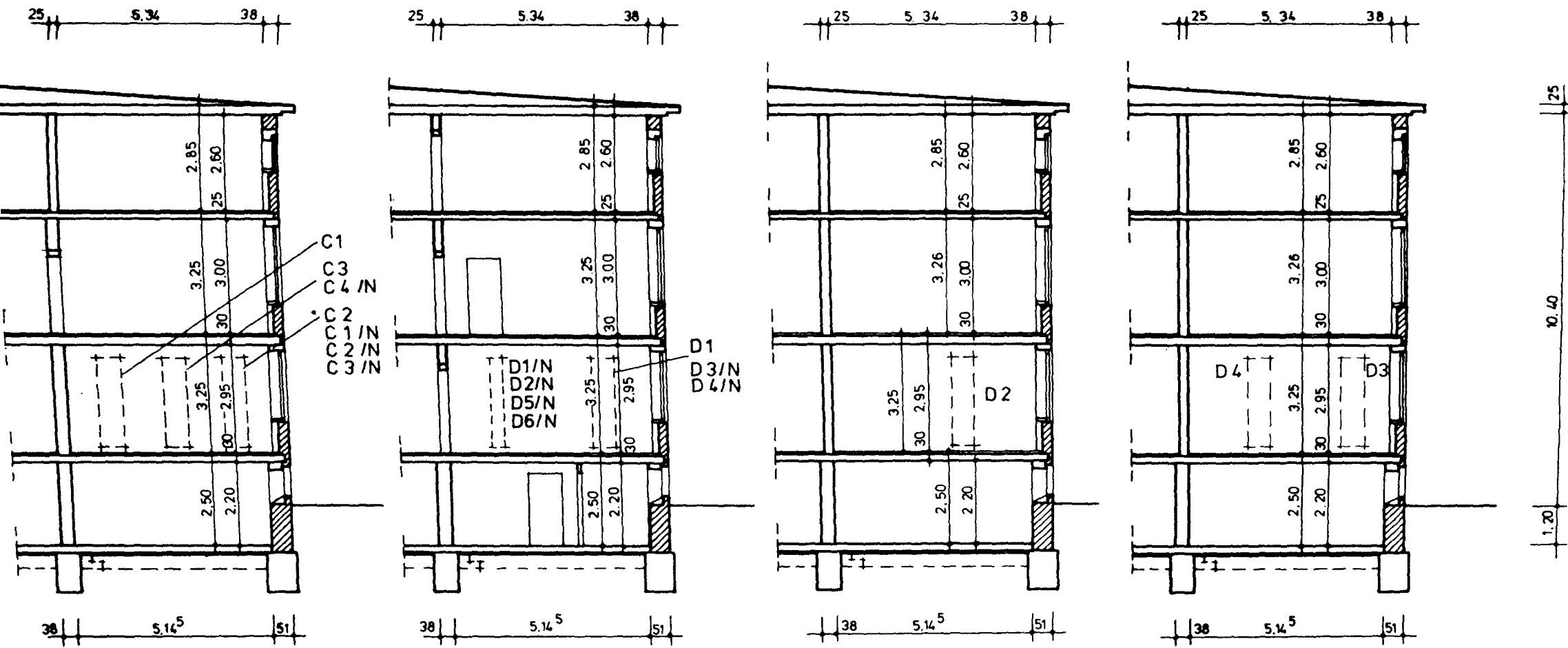
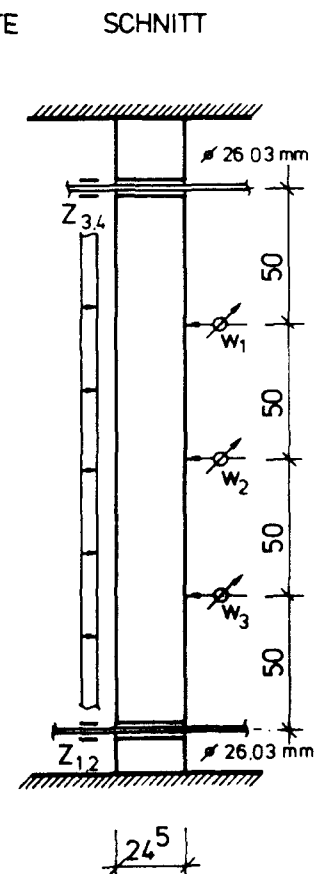
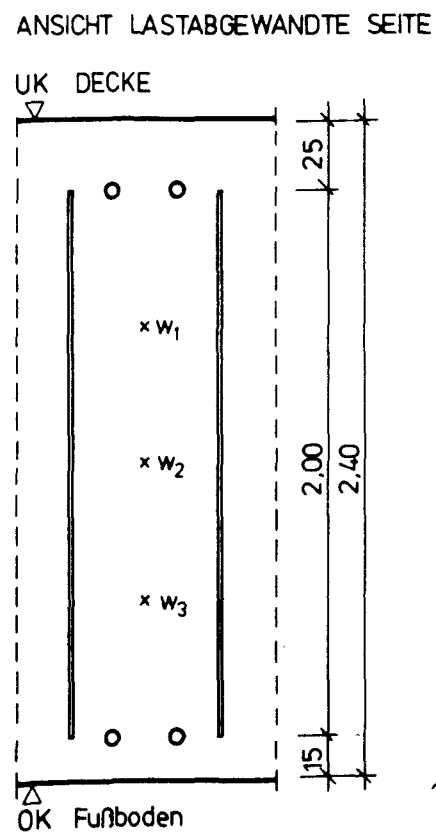
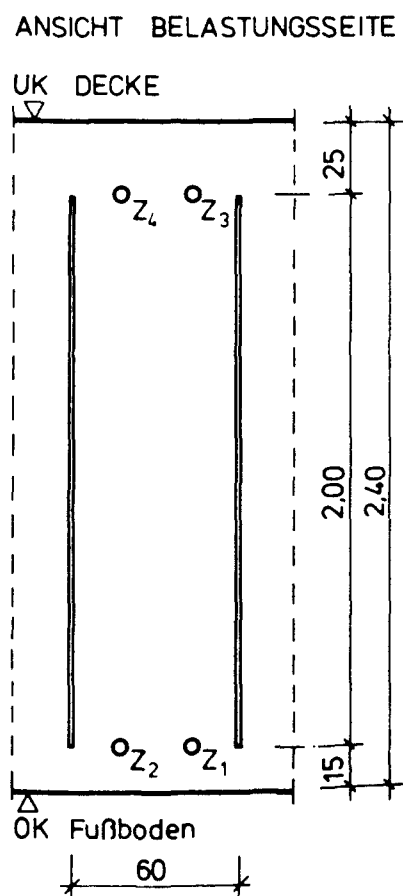


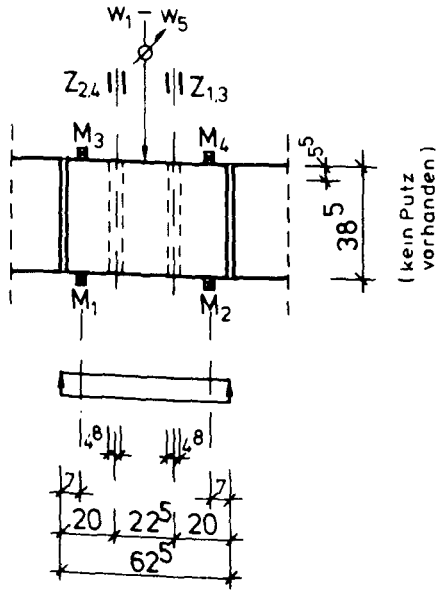
Bild 32: Wandlängsschnitte / Versuchspfeiler im 2. Gebäude

The technical drawing consists of two parts. The top part is a cross-section of a beam, showing a rectangular shape with a central hole. The hole is labeled with a diameter symbol \varnothing and the text $w_1 - w_3$ above it. The hole is flanked by two vertical sections labeled $Z_{2,4}$ and $Z_{1,3}$. The total width of the beam is indicated as 245. To the right of the cross-section, there is a note in German: "(kein Putz vorhanden)". The bottom part is a longitudinal view of the beam, showing its length. The total length is 60. The distance from the left end to the center of the hole is 16.5, and the distance from the center of the hole to the right end is also 16.5. The distance between the two vertical sections $Z_{2,4}$ and $Z_{1,3}$ is 27. The hole is labeled with a diameter symbol \varnothing and the text $w_1 - w_3$ above it.

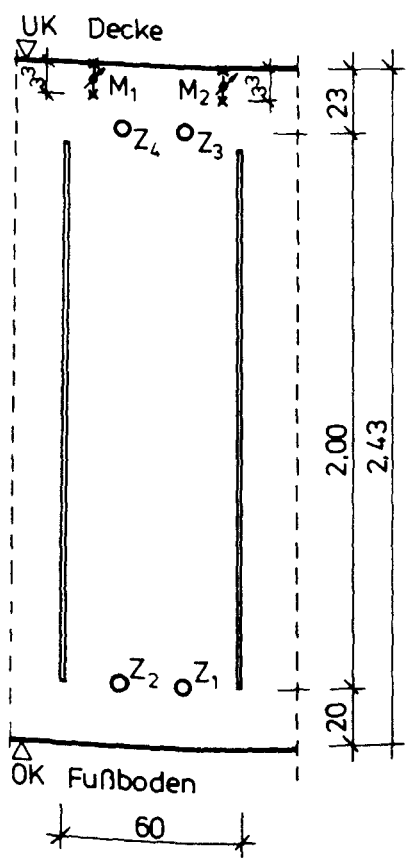


04/06/2014

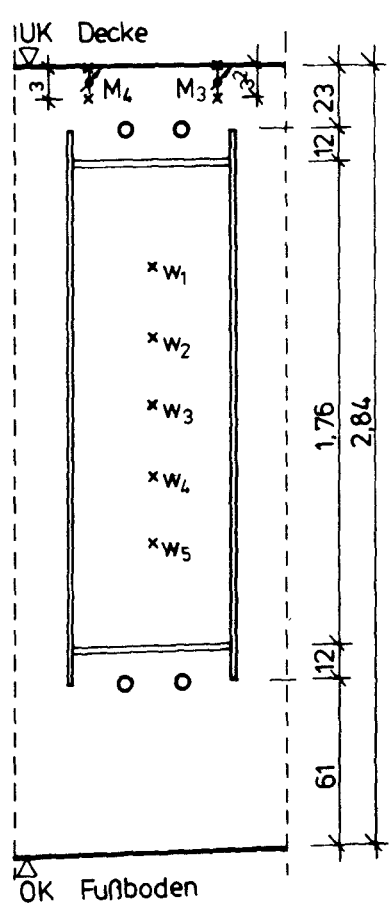
GRUNDRISS



ANSICHT BELASTUNGSSEITE



ANSICHT LASTABGEWANDTE SEITE



SNITT

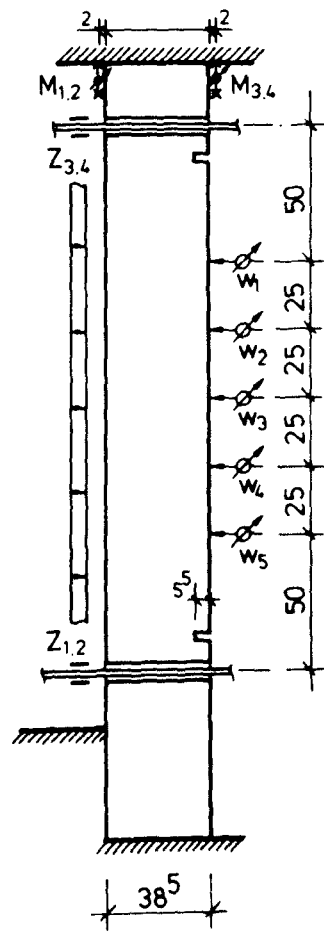


Bild 34: Geometrie und Meßstellenanordnung B1

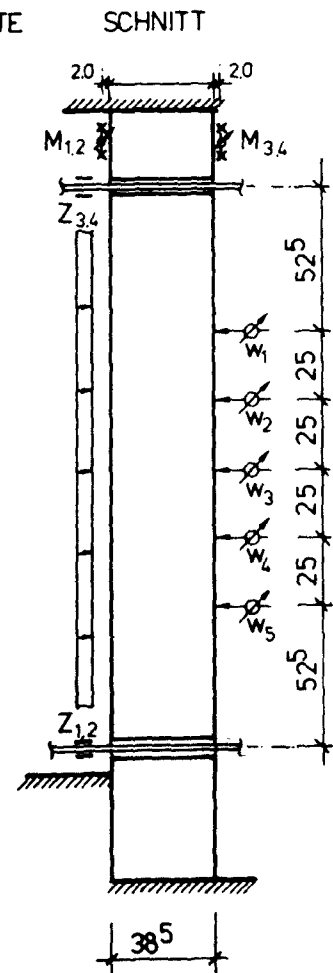
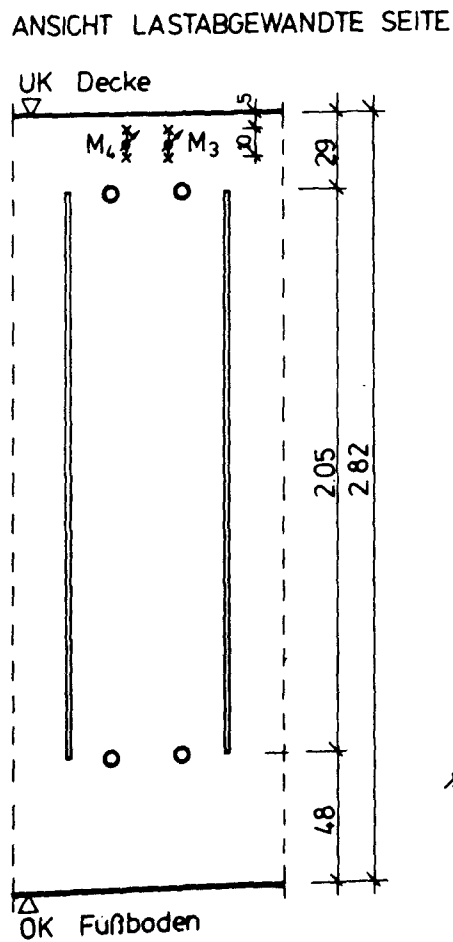
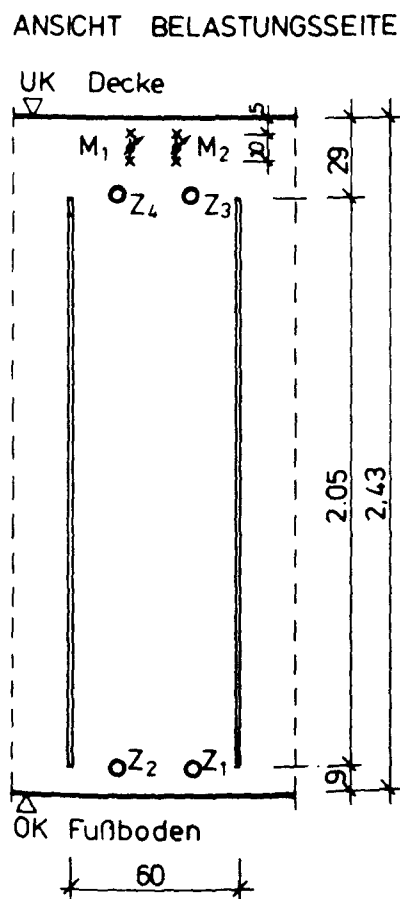
The drawing consists of two parts: a side elevation (top) and a top view (bottom).

Side Elevation: Shows a cross-section of a window frame. The frame has a total height of 385. The central opening is flanked by two vertical sections. The top of the frame is labeled with w_1 and $-w_5$. The left and right vertical sections are labeled $Z_{2,4}$ and $Z_{1,3}$ respectively. The frame is supported by four points labeled M_1 , M_2 , M_3 , and M_4 .

Top View: Shows the plan of the window frame. The overall width is 60 and the overall height is 165. The central opening has a width of 27 and a height of 16. The side sections are 22 wide each. The frame is supported by four points labeled M_1 , M_2 , M_3 , and M_4 .

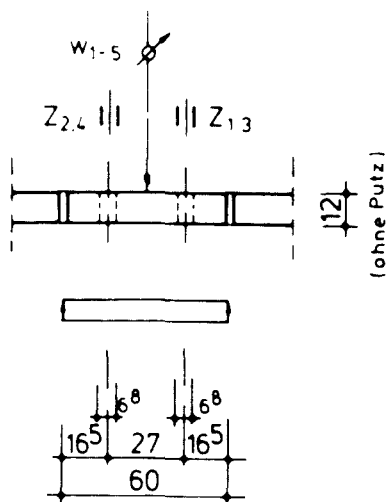
Notes:

- (keine Putz vorhanden)



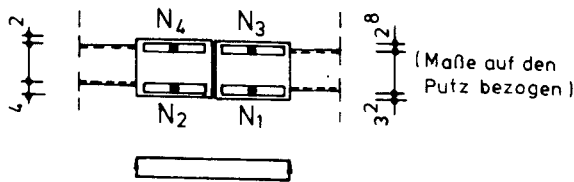
<http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056487>

GRUNDRISS

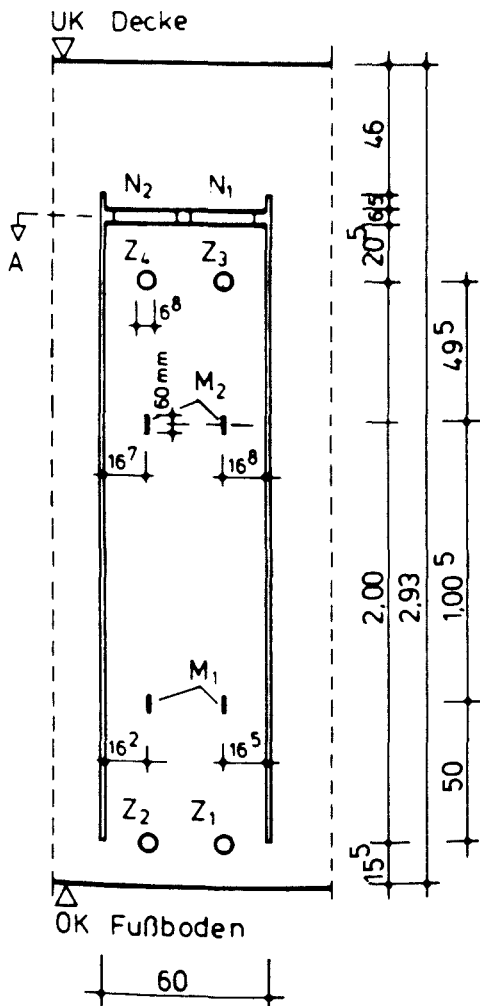


GRUNDRISS

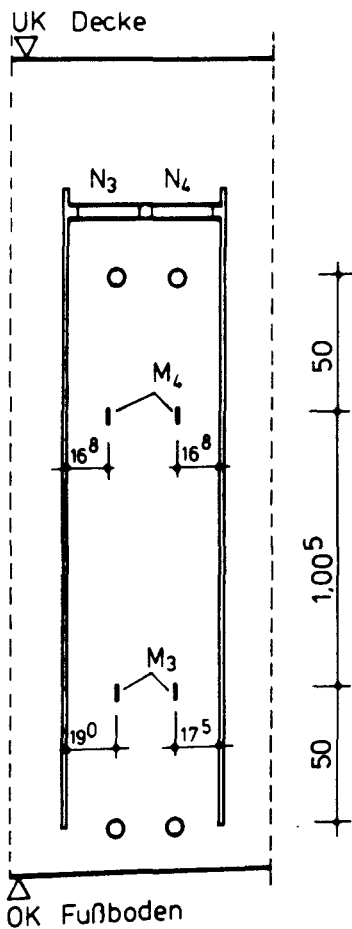
Meßzelle (Schnitt A)



ANSICHT BELASTUNGSSEITE



ANSICHT LASTABGEWANDTE SEITE



SCHNITT

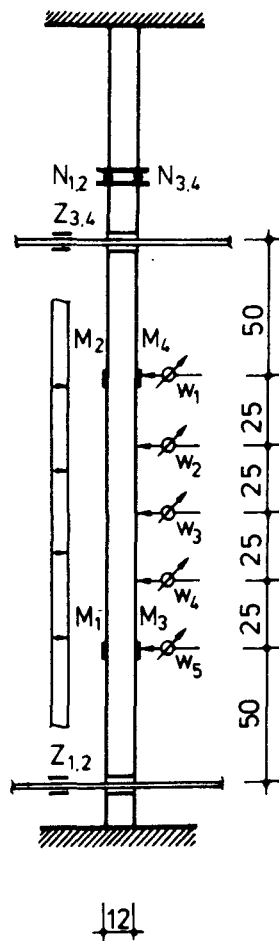


Bild 36: Geometrie und Meßstellenanordnung C1

Technical drawing of a mechanical part, likely a shaft or pipe, showing dimensions and labels.

Labels and dimensions:

- W_{1-5} (with a symbol indicating a specific feature)
- $Z_{2,4}$ and $Z_{1,3}$ (with vertical lines indicating specific features)
- Dimensions: 12, 16, 25, 18, 60
- Label: (ohne Putz)

Meßzelle (Schnitt A)

Technical drawing of a rectangular frame structure, likely a window or door frame, showing dimensions and internal components.

Dimensions:

- Overall width: 60
- Overall height: 535
- Top section height: 455
- Bottom section height: 15
- Left side height: 1.01
- Right side height: 2.00
- Internal height: 525
- Internal width: 94
- Internal height (top): 1768
- Internal height (bottom): 293
- Internal width (top): 47

Labels and Components:

- UK Decke (Top boundary)
- OK Fußboden (Bottom boundary)
- N_1 , N_2 (Top corners)
- Z_1 , Z_2 (Bottom corners)
- Z_3 , Z_4 (Internal corners)
- M_1 (Internal horizontal component)
- M_2 (Internal vertical component)
- 60 mm (Dimension for internal vertical component)
- 165, 164 (Dimensions for internal vertical component)
- 165, 164 (Dimensions for internal vertical component)

Diagramm einer zweigeschossigen Stabtragwerksstruktur mit einer Stützweite von 9,35 m. Die Struktur besteht aus zwei horizontalen Stäben (N3, N4) und zwei vertikalen Stäben (M3, M4). Die Stützweite ist in drei Abschnitte unterteilt: 5,35 m, 9,35 m und 5,35 m. Die vertikalen Stäbe sind mit 16,5 m und 21,0 m dimensioniert. Die horizontalen Stäbe sind mit 20,5 m dimensioniert. Die Struktur ist an beiden Enden durch Pfeile (UK, OK) gekennzeichnet.

Bild 37: Geometrie und Meßstellenanordnung C2

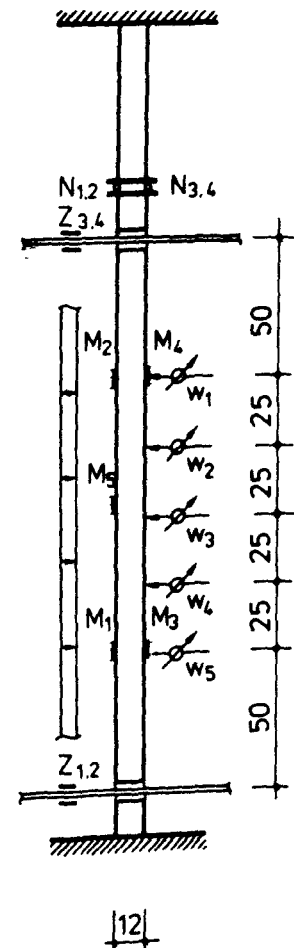
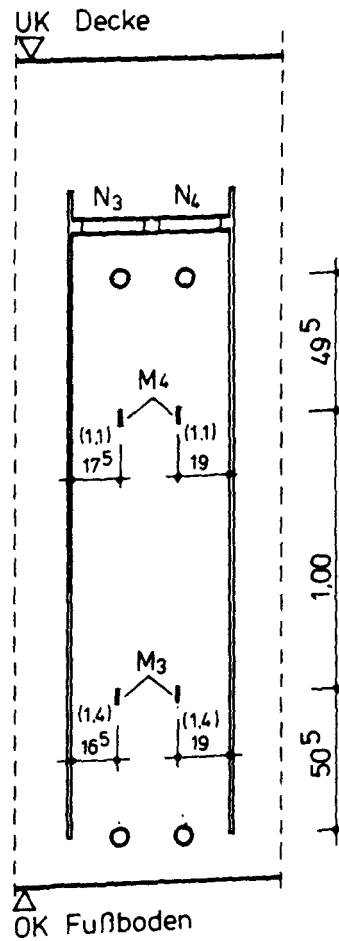
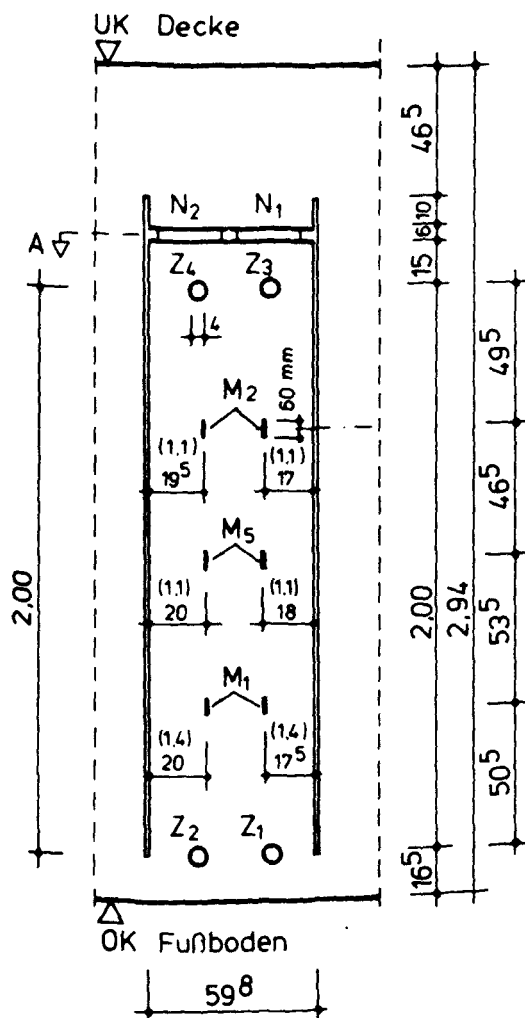
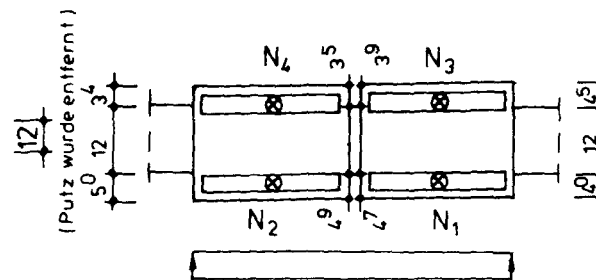
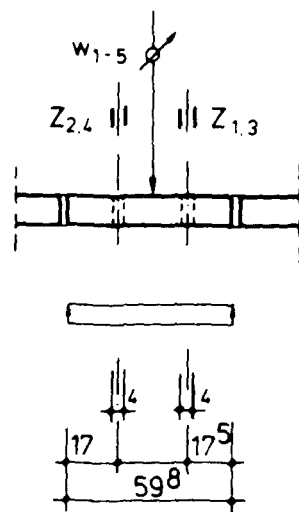
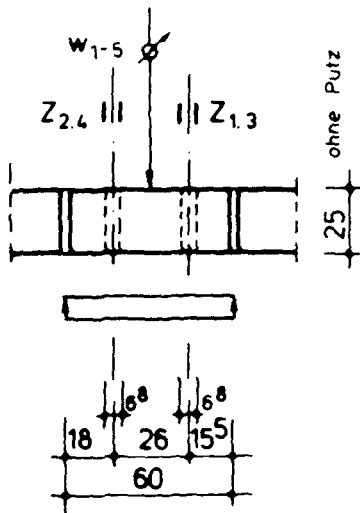


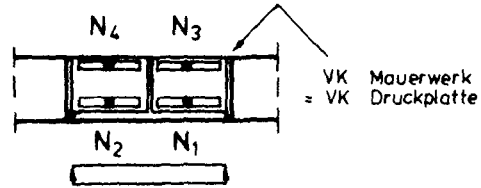
Bild 38: Geometrie und Meßstellenanordnung C3

GRUNDRISS

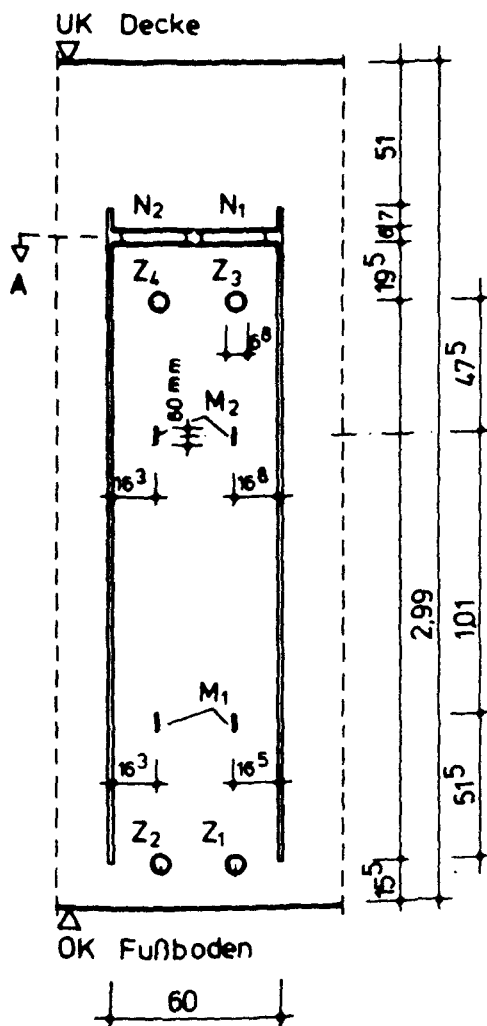


GRUNDRISS

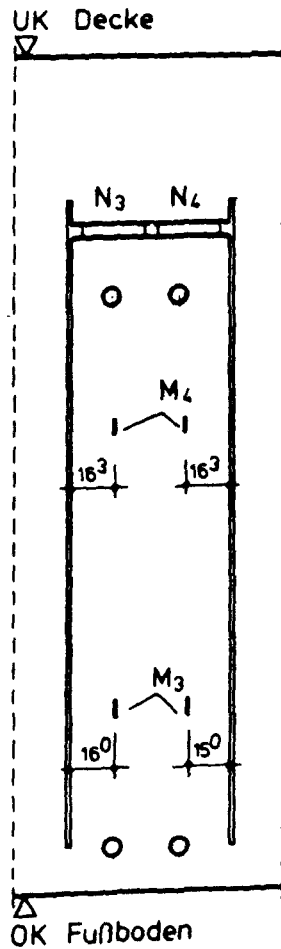
Meßzelle (Schnitt A)



ANSICHT BELASTUNGSSEITE



ANSICHT LASTABGEWANDTE SEITE



SCHNITT

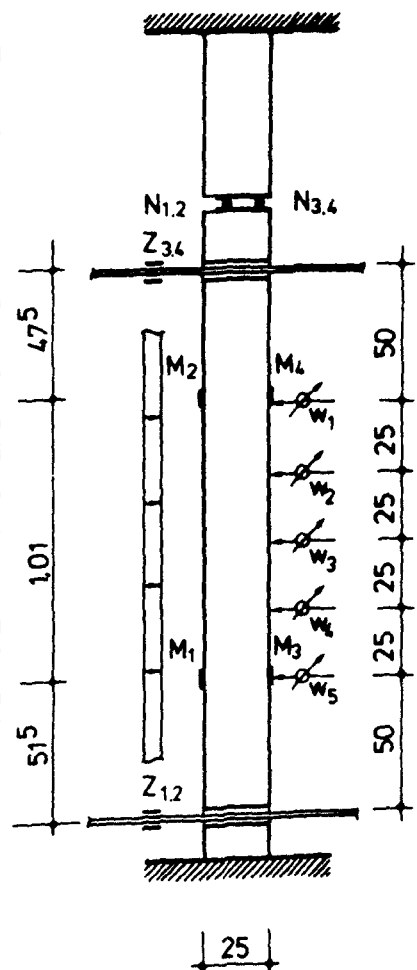
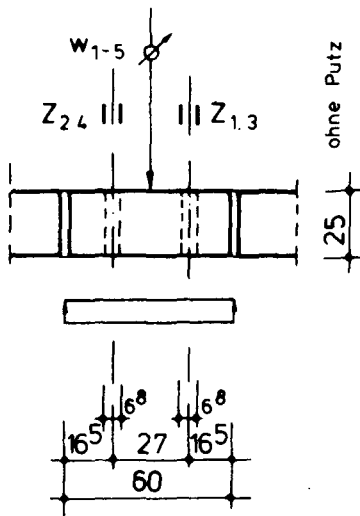


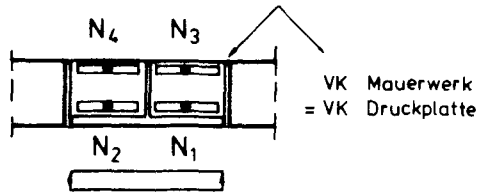
Bild 39: Geometrie und Meßstellenanordnung D1

GRUNDRISS

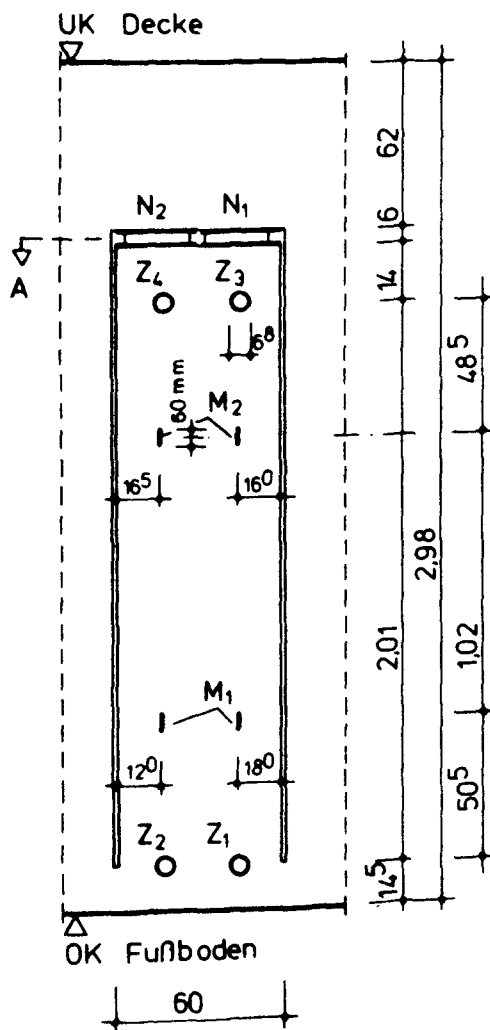


GRUNDRISS

Meßzelle (Schnitt A)



ANSICHT BELASTUNGSSEITE



ANSICHT LASTABGEWANDTE SEITE

SCHNITT

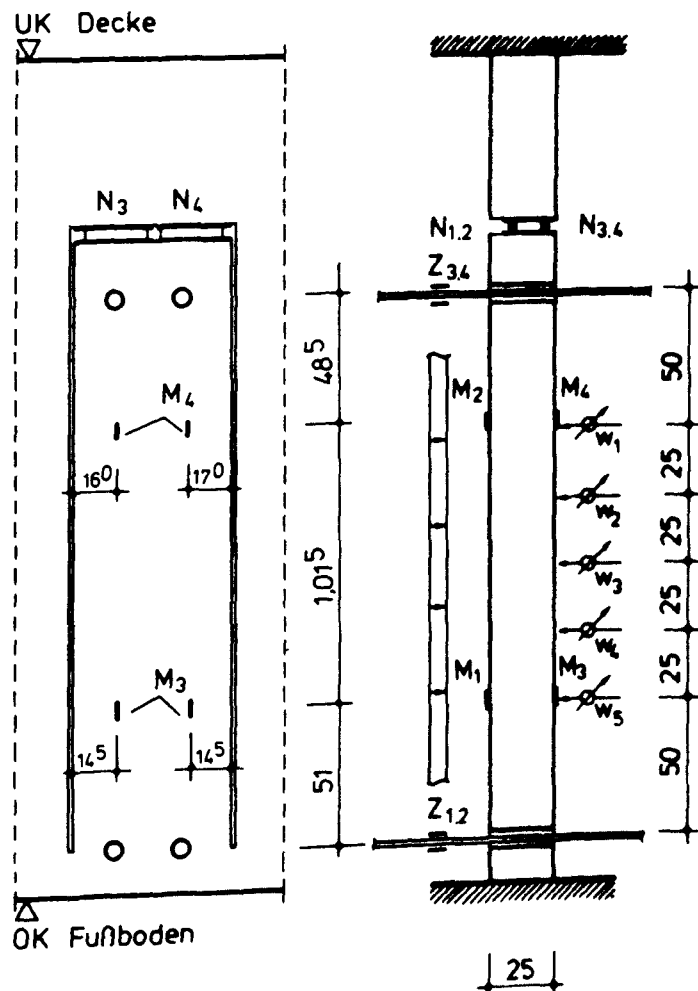
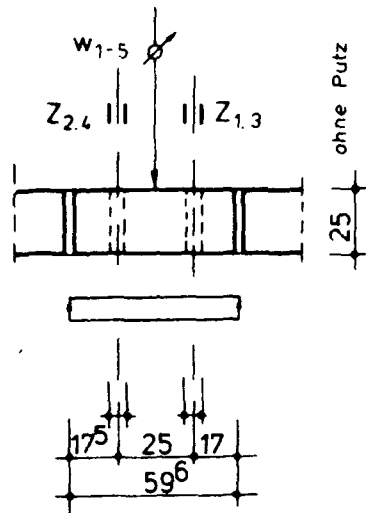


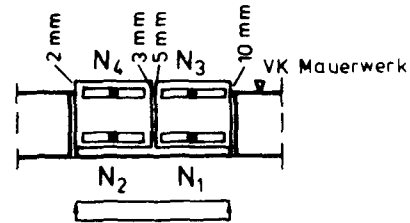
Bild 40: Geometrie und Meßstellenanordnung D2

GRUNDRISS

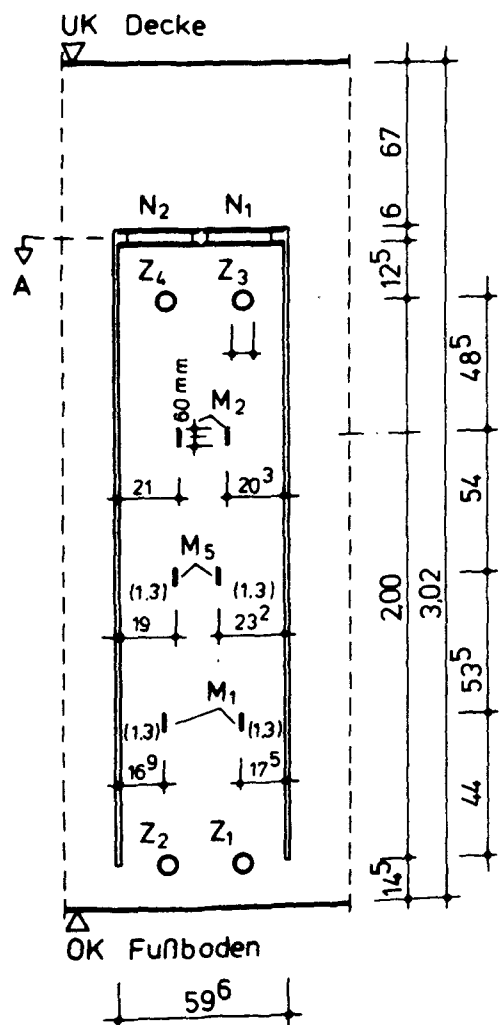


GRUNDRISS

Meßzelle (Schnitt A)



ANSICHT BELASTUNGSSEITE



ANSICHT LASTABGEWANDTE SEITE

SCHNITT

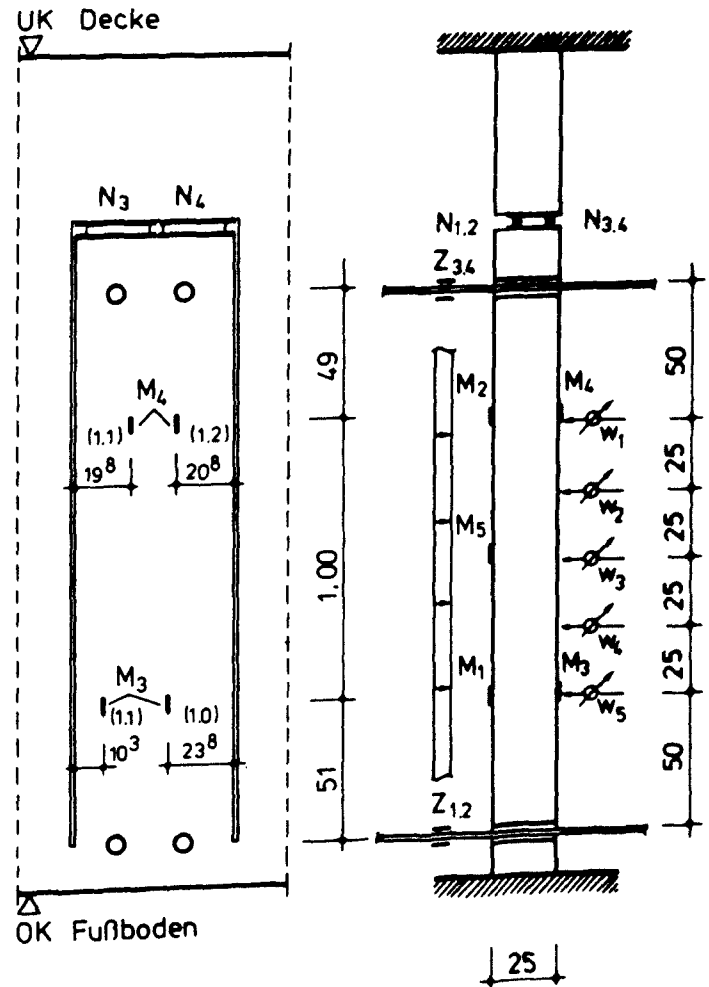
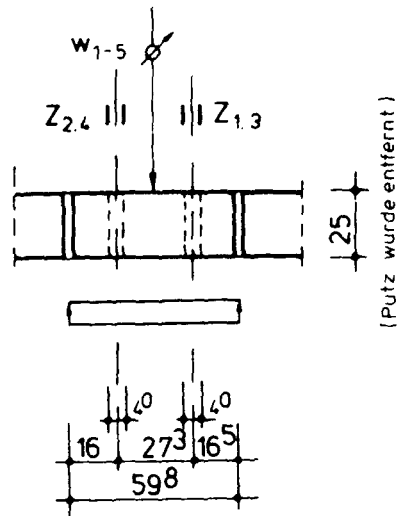


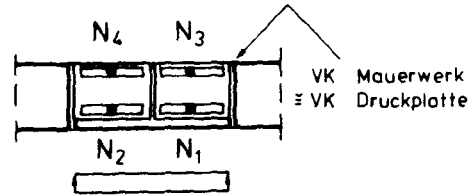
Bild 41: Geometrie und Meßstellenanordnung D3

GRUNDRISS

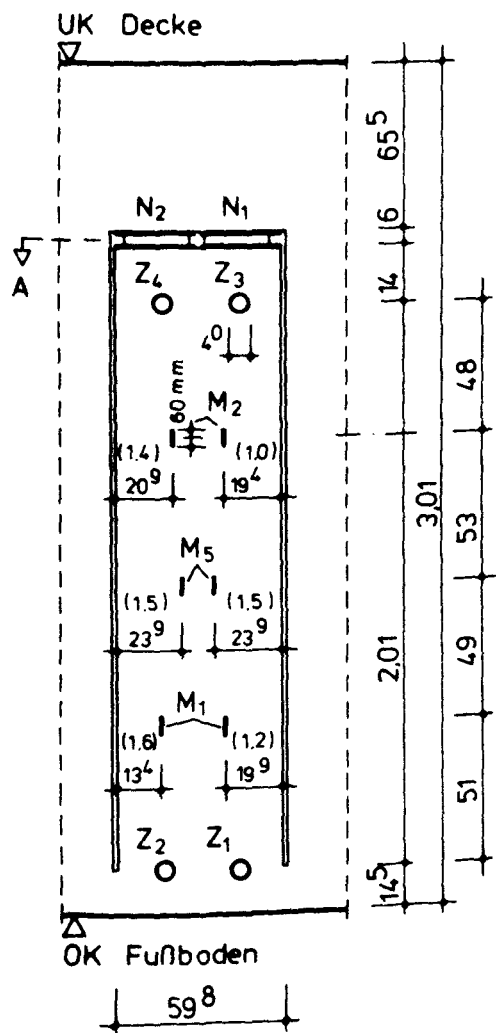


GRUNDRISS

Meßzelle (Schnitt A)



ANSICHT BELASTUNGSSEITE



ANSICHT LASTABGEWANDTE SEITE

SCHNITT

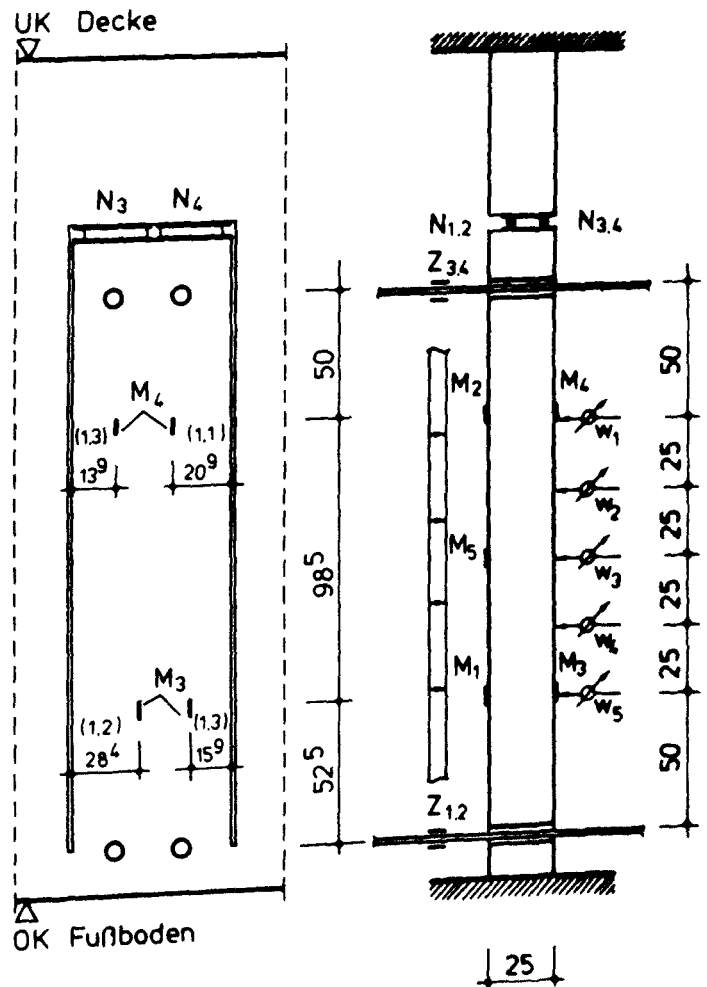


Bild 42: Geometrie und Meßstellenanordnung D4

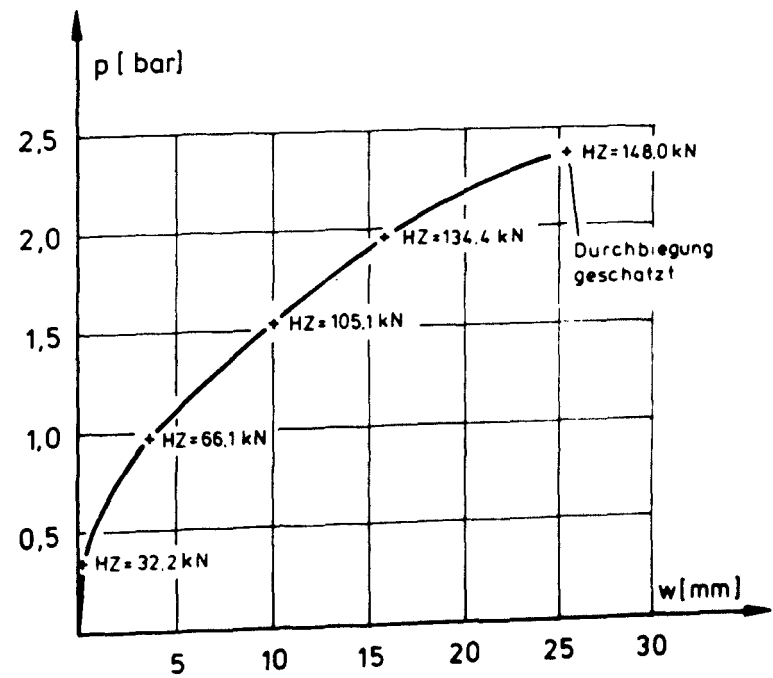
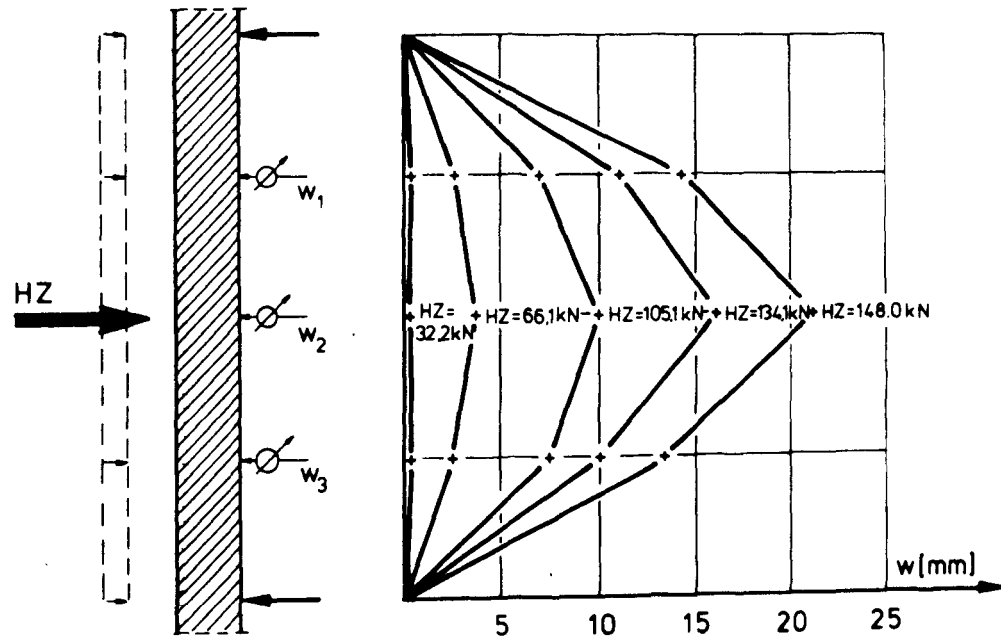


Bild 43: Durchbiegungen A1

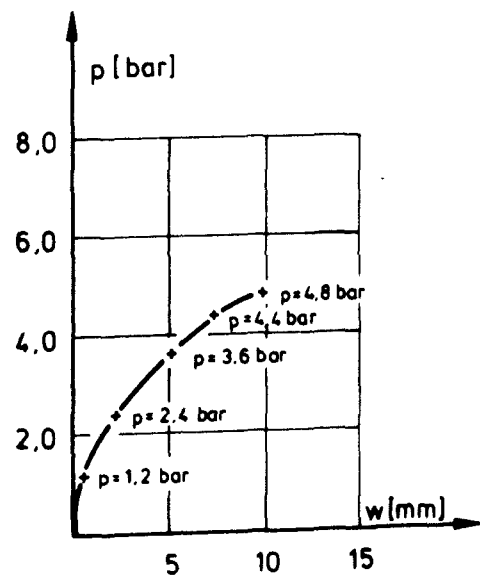
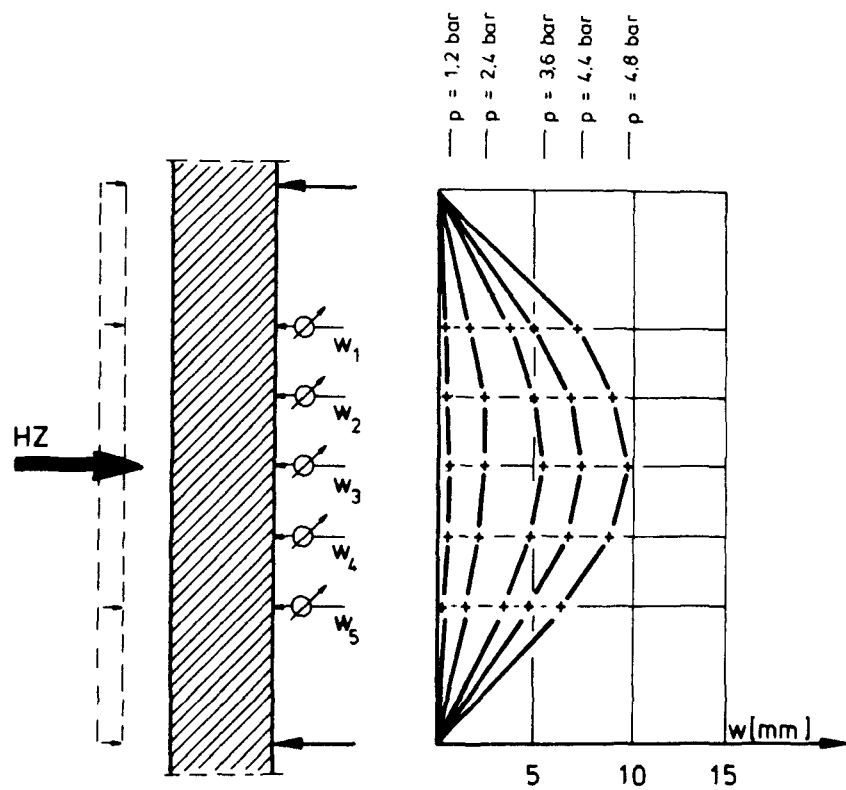


Bild 44: Durchbiegungen B1

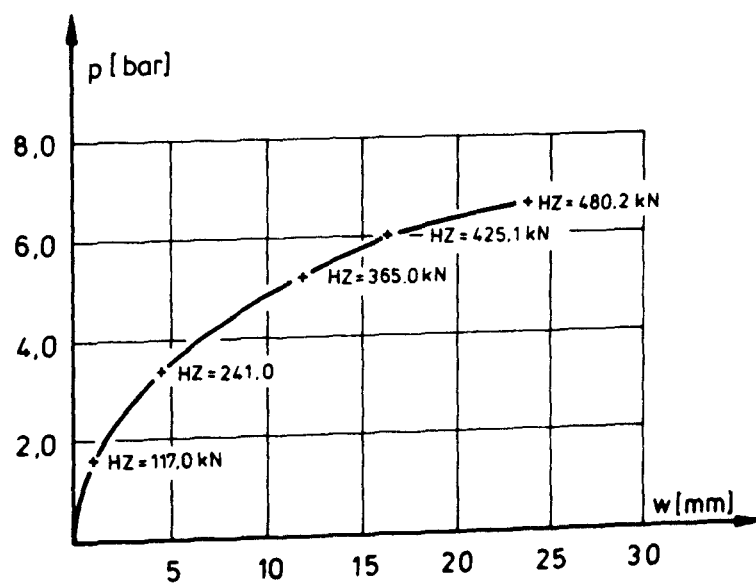
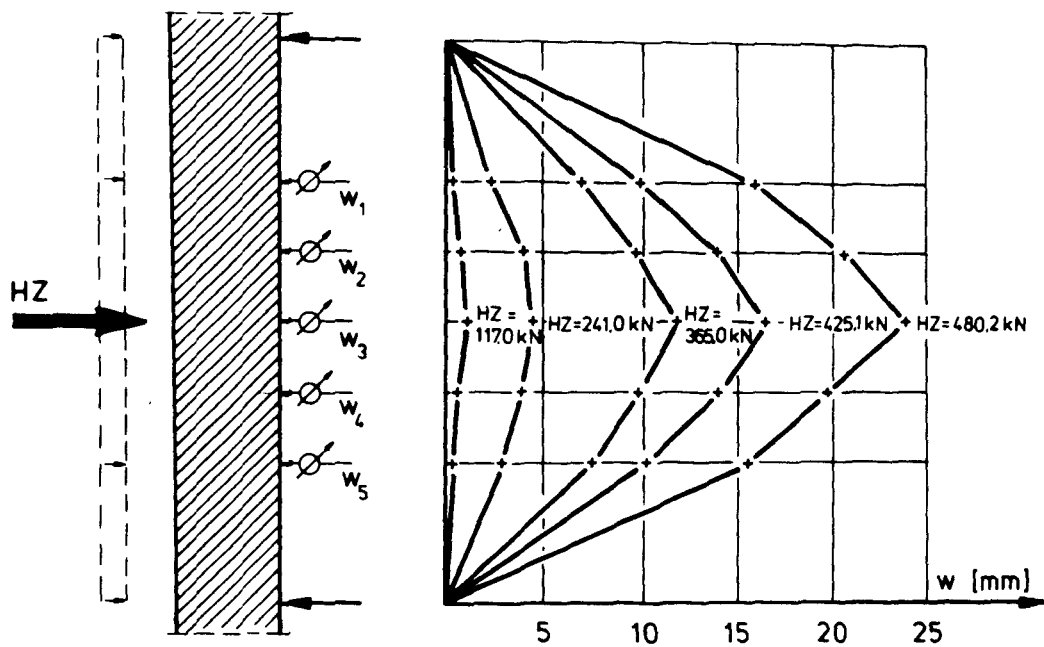


Bild 45: Durchbiegungen B2

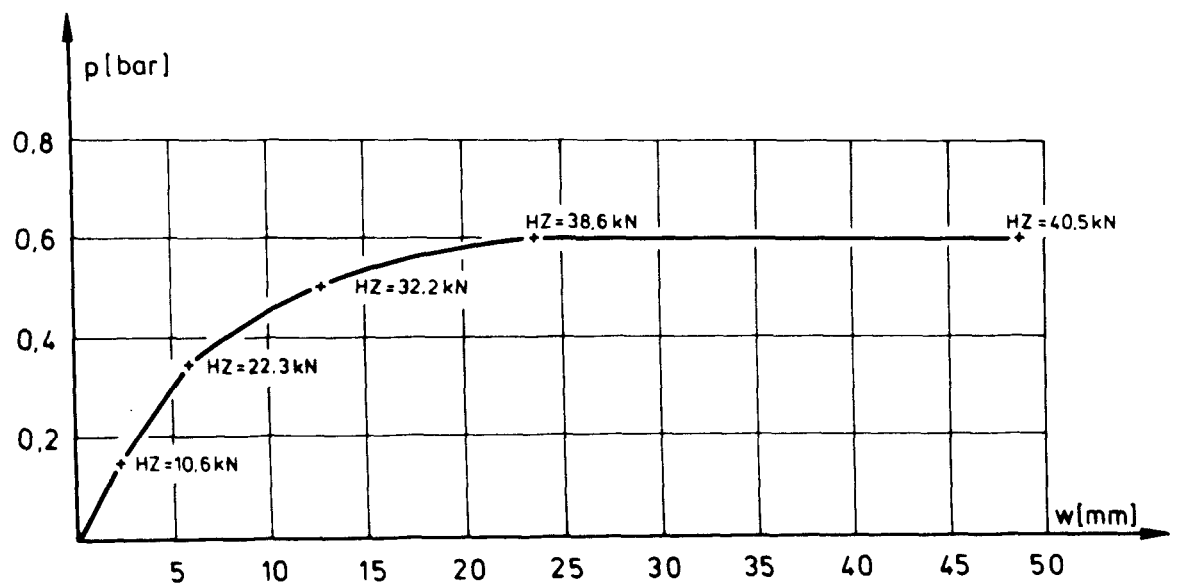
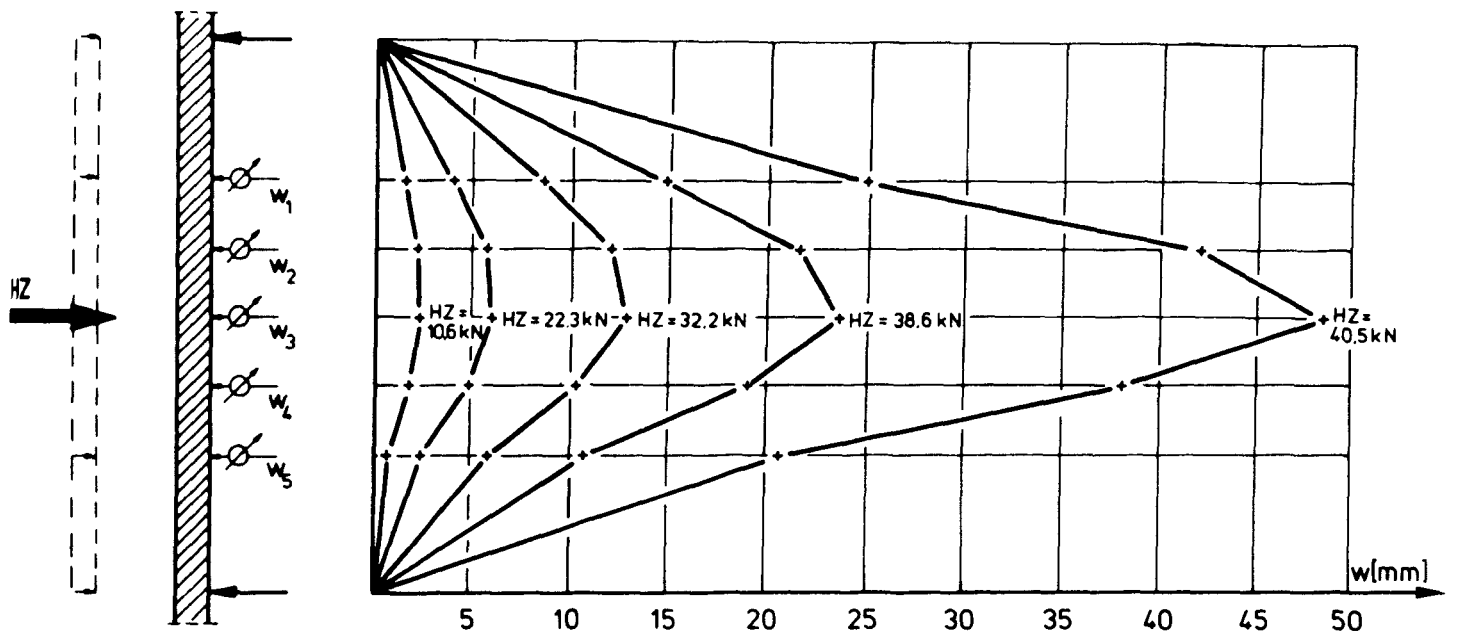


Bild 46: Durchbiegungen C1

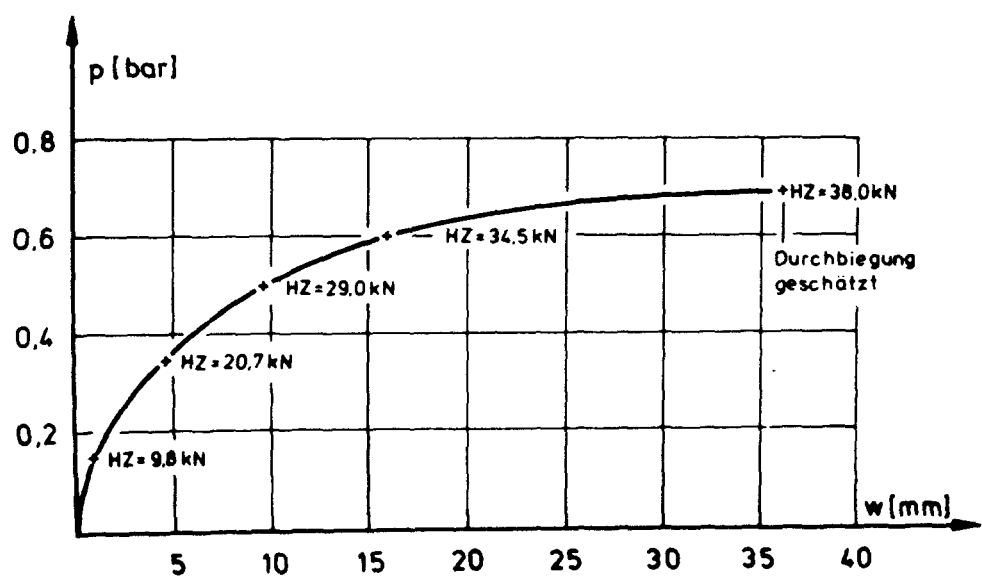
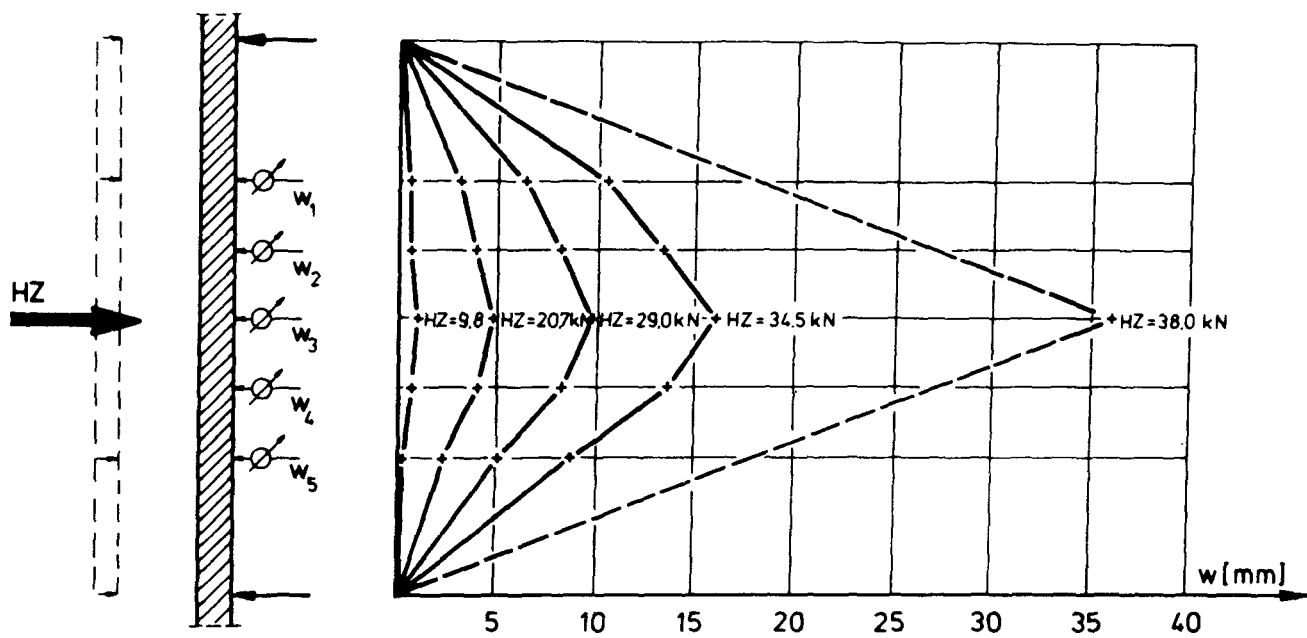


Bild 47: Durchbiegungen C2

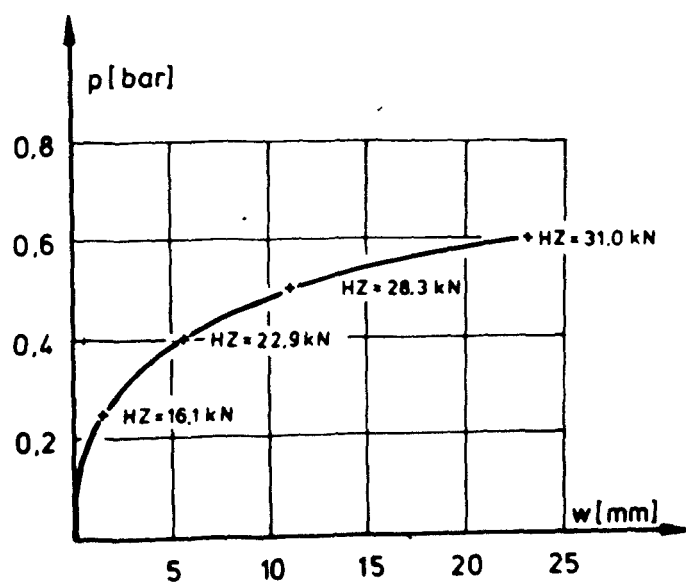
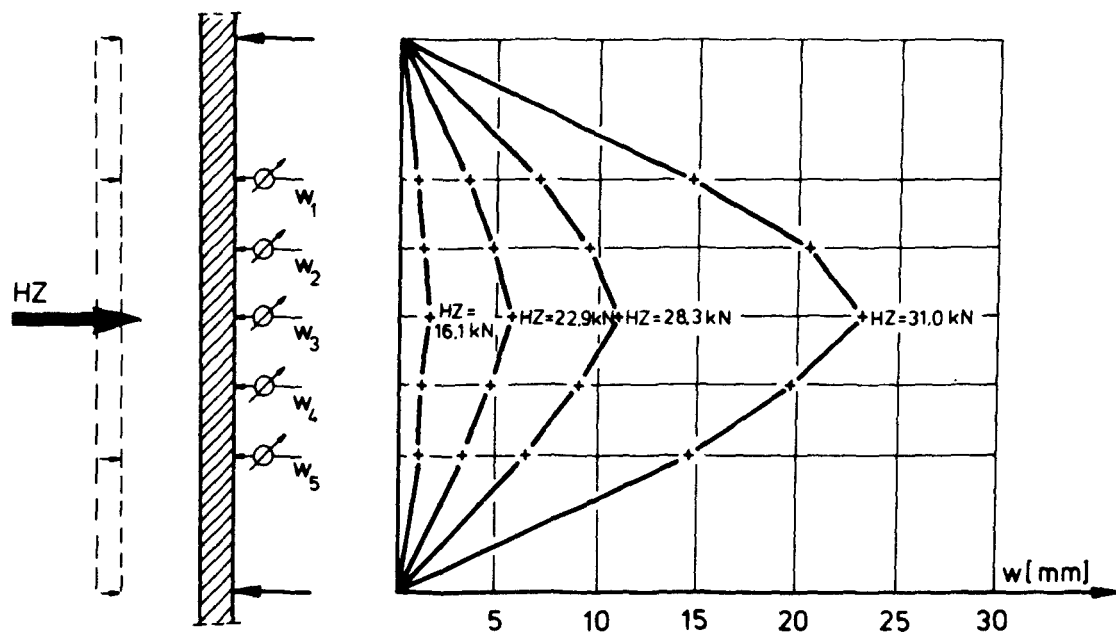


Bild 48: Durchbiegungen C3

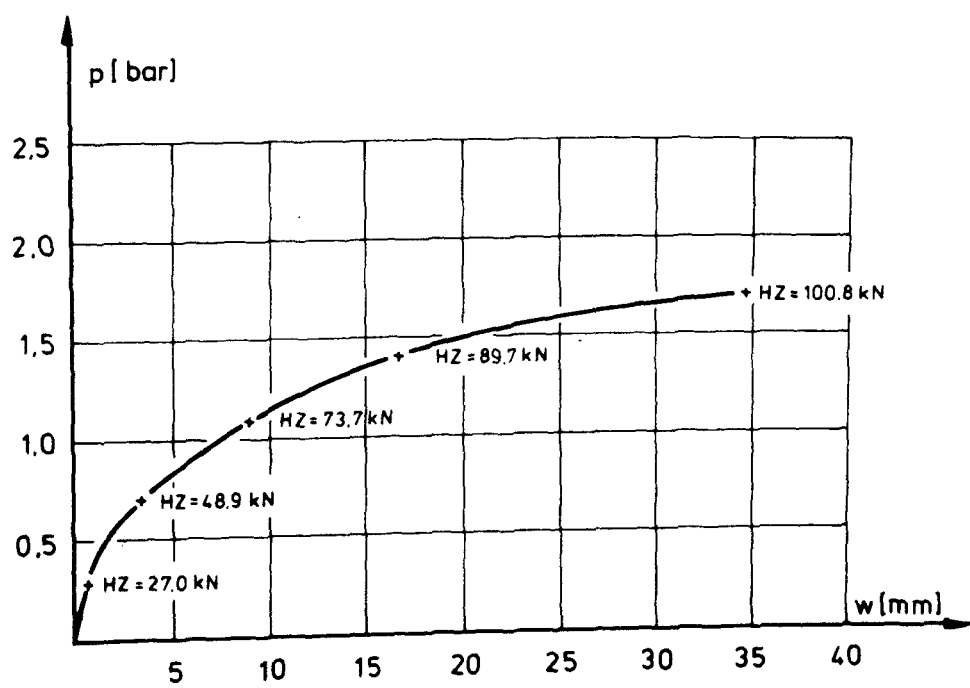
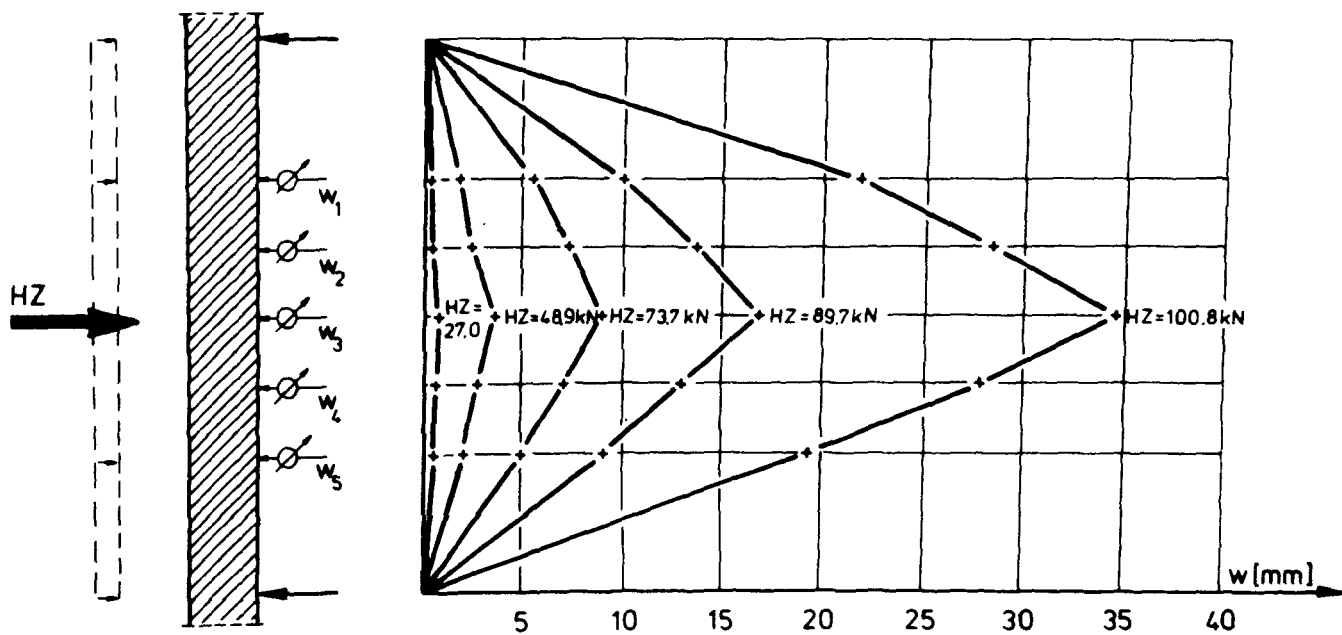


Bild 49: Durchbiegungen D1

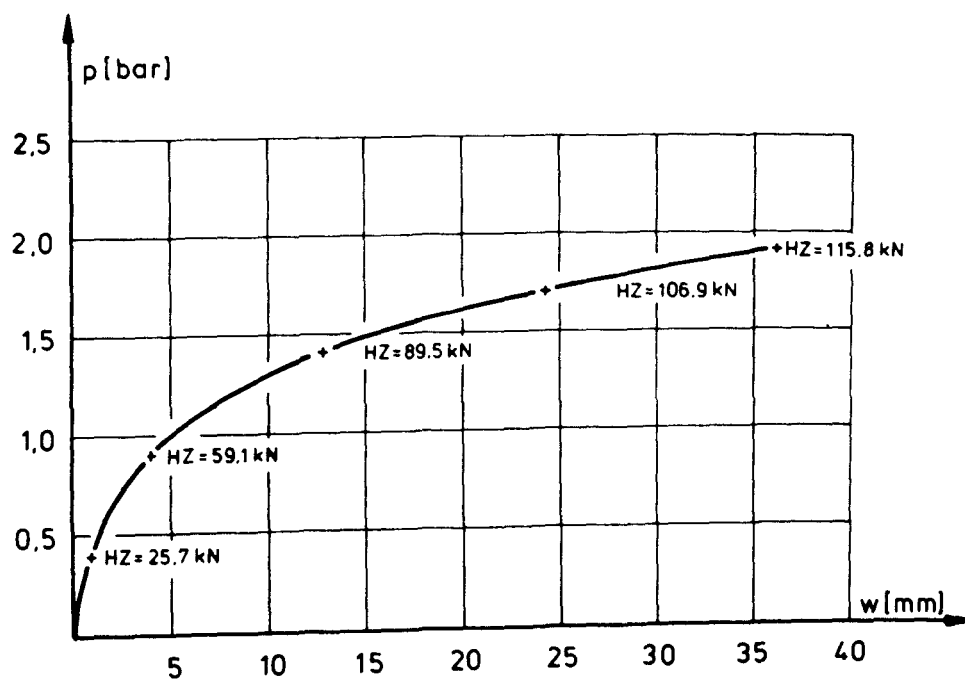
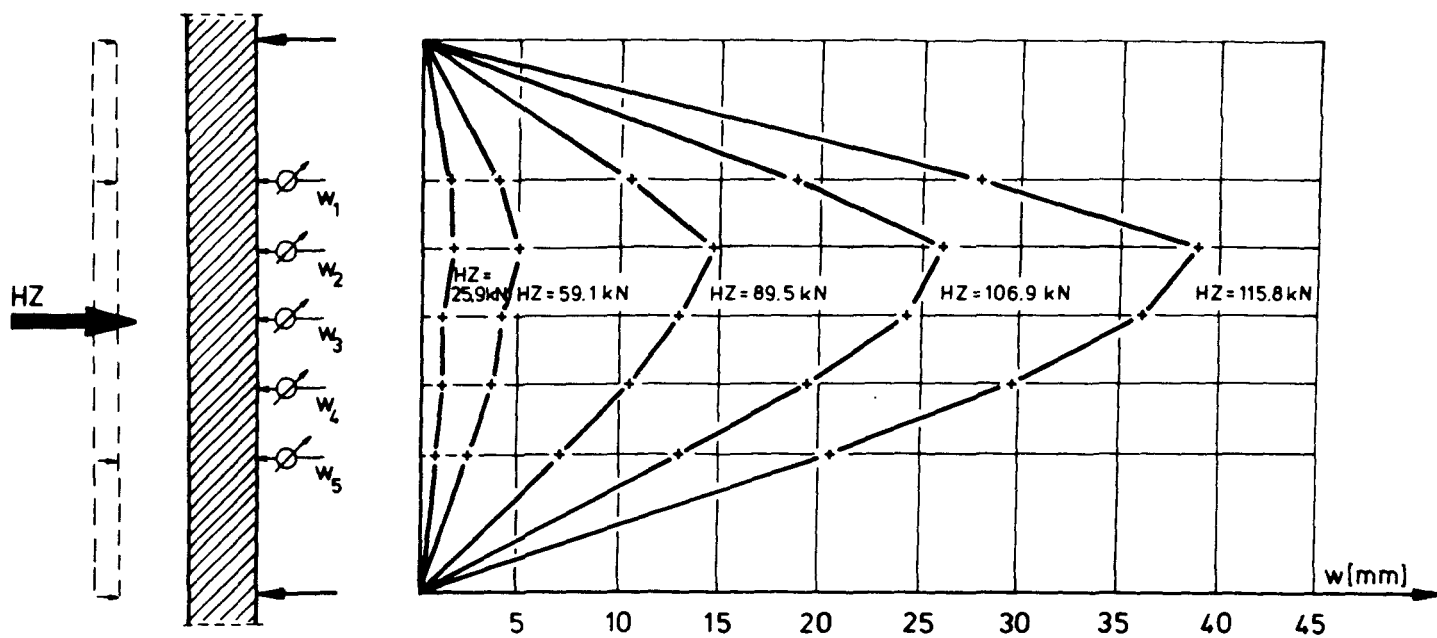


Bild 50: Durchbiegungen D2

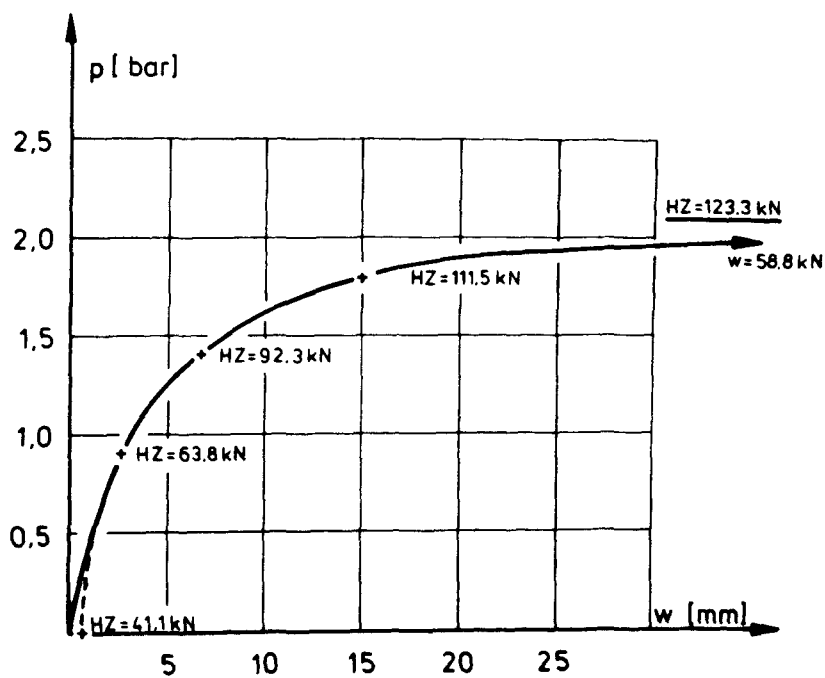
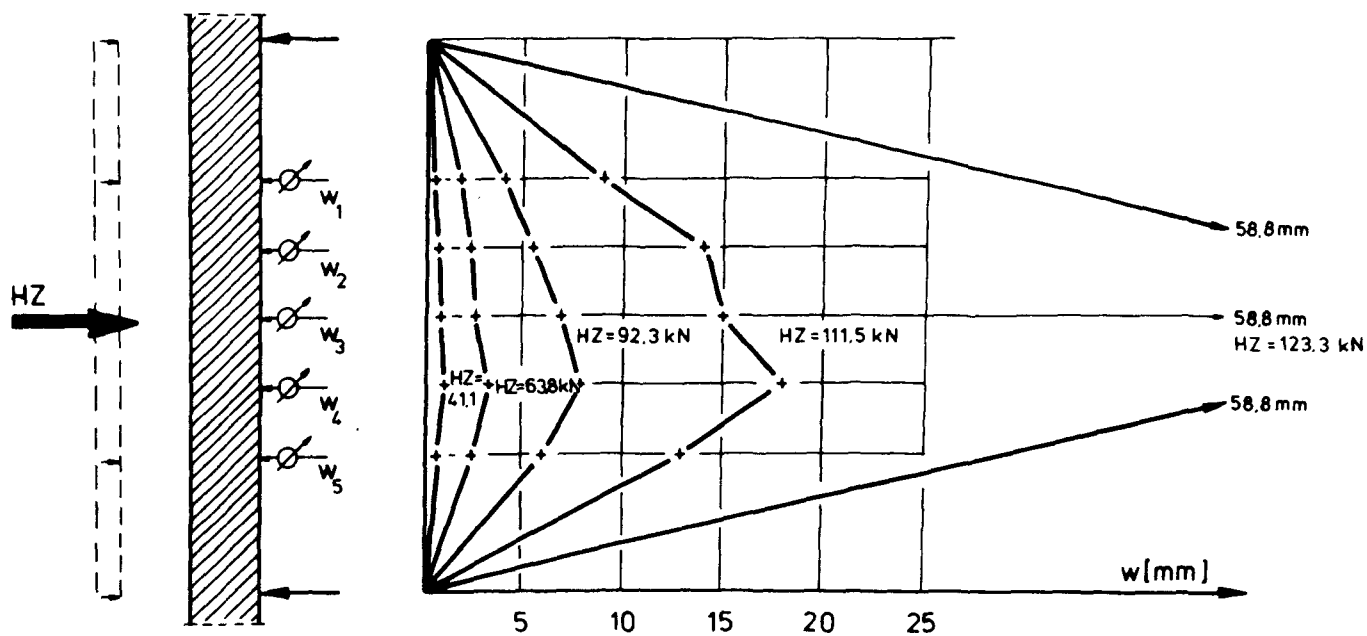


Bild 51: Durchbiegungen D3

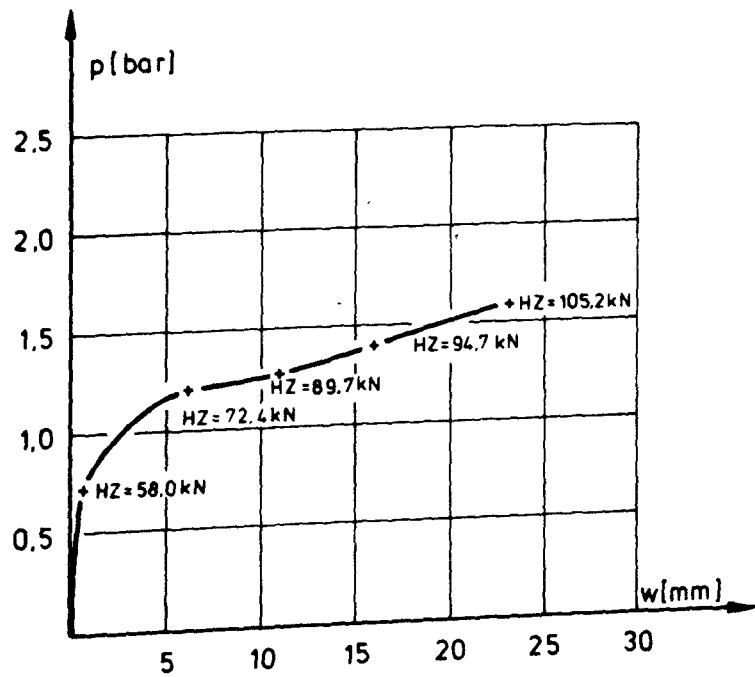
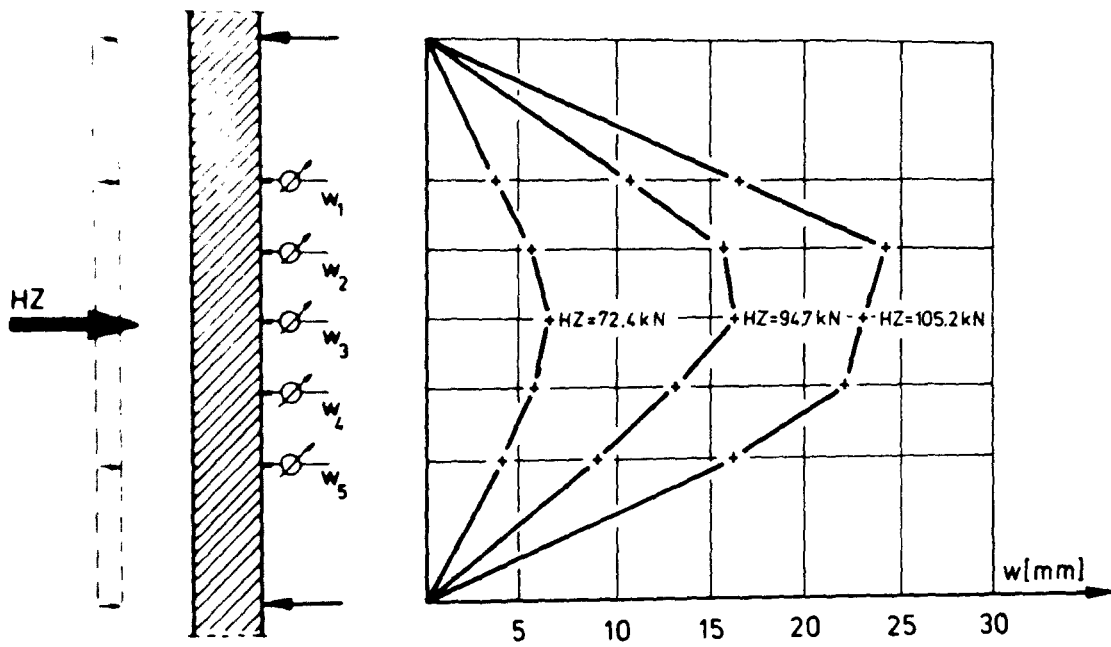


Bild 52: Durchbiegungen D4

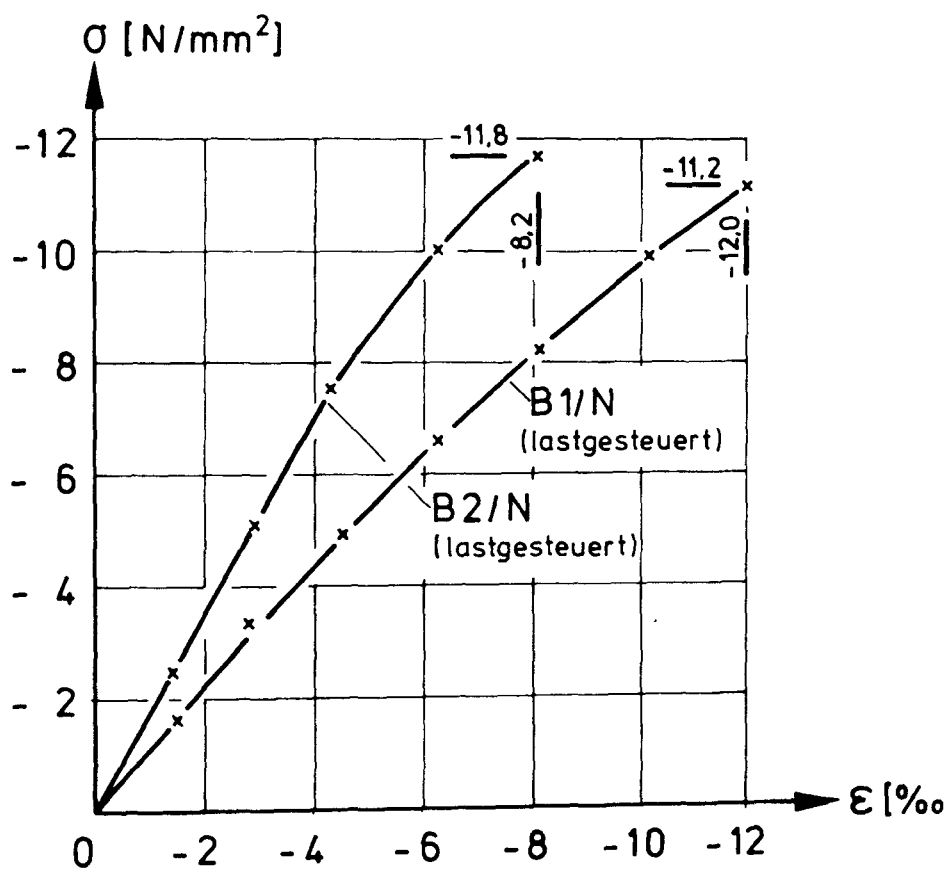


Bild 53: σ - ϵ -Linien Mauerwerkstyp B (mittige Belastung)

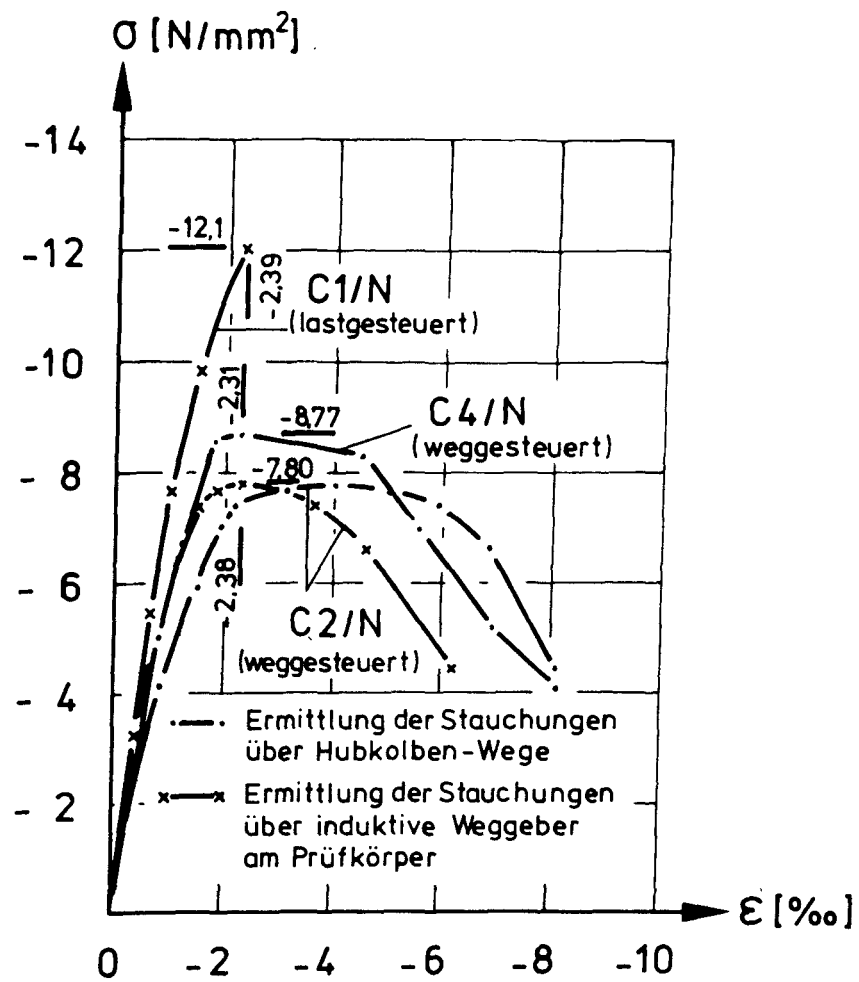


Bild 54: σ-ε-Linien Mauerwerkstyp C (mittige Belastung)

σ [N/mm²]

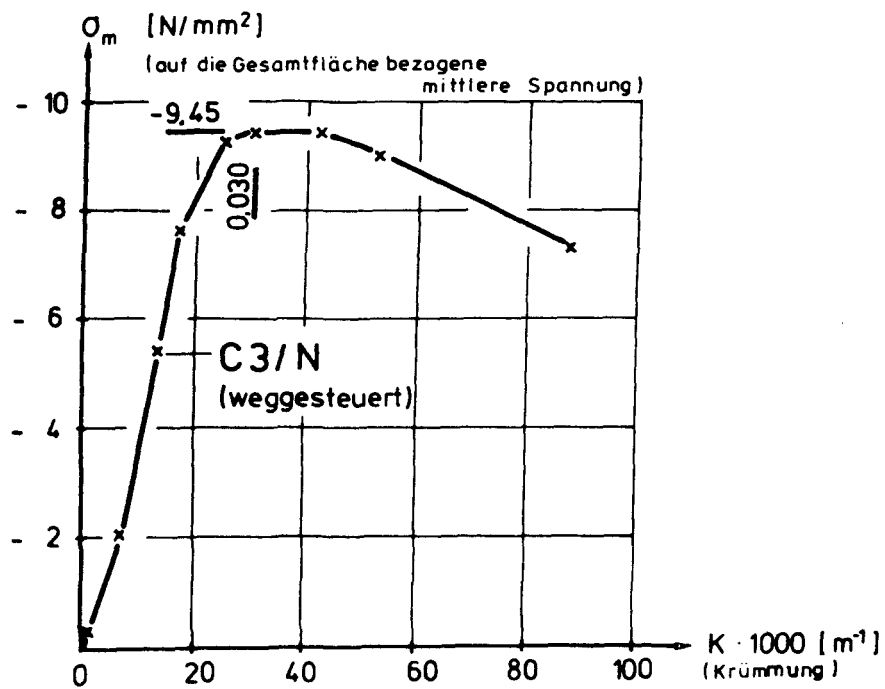
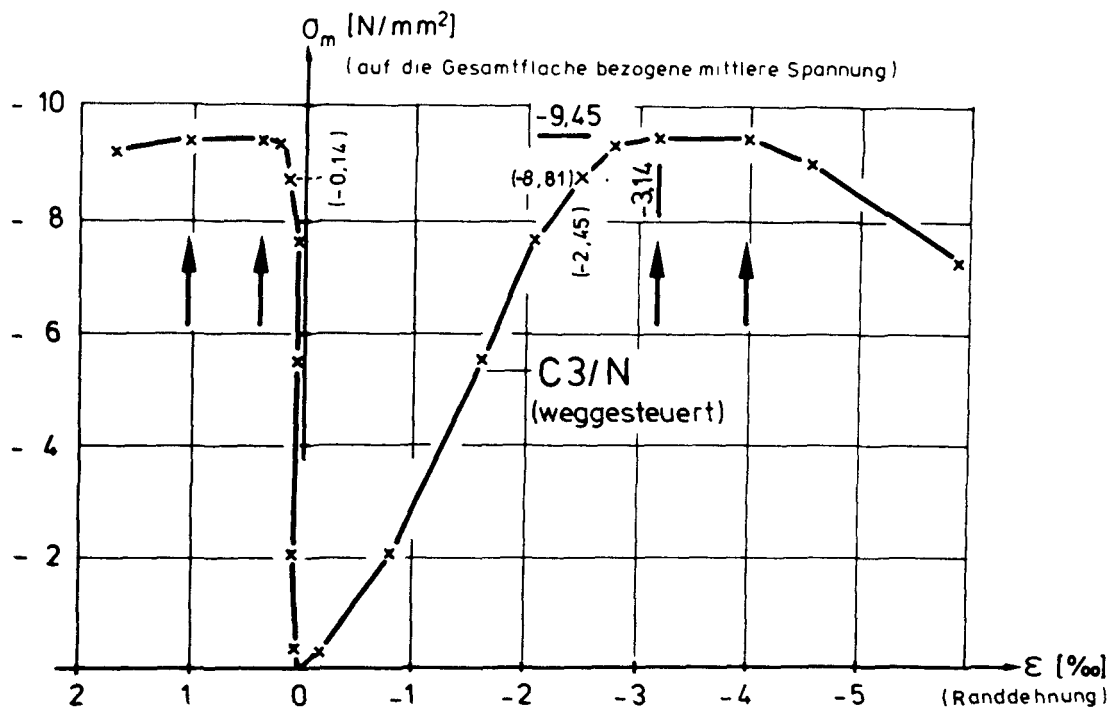


Bild 56: Randstauchungen und Krümmungen
Mauerwerkstyp C (ausmittige Belastung)

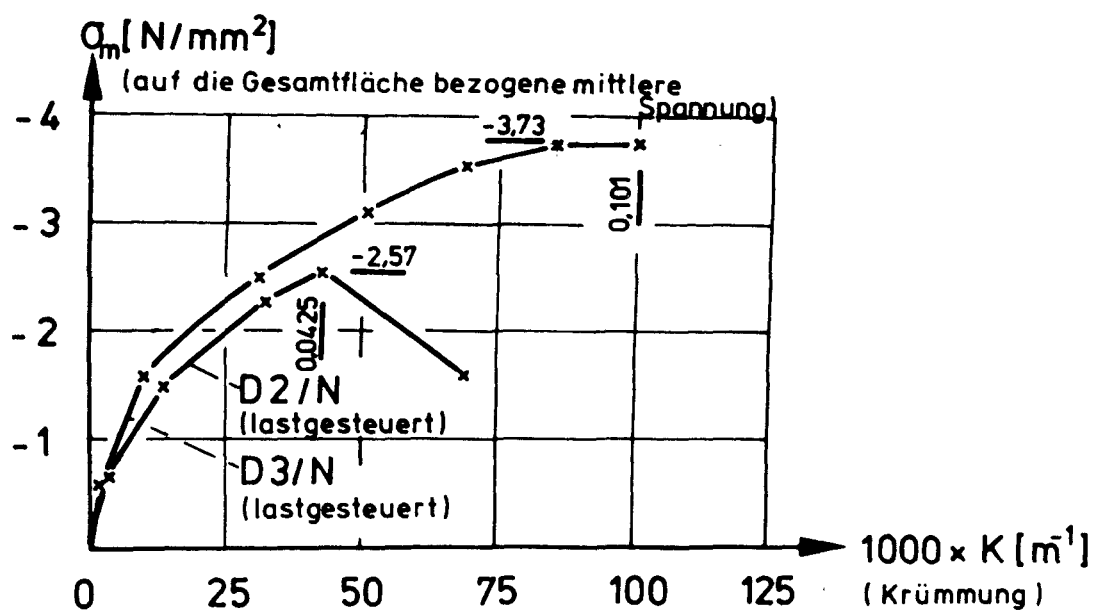
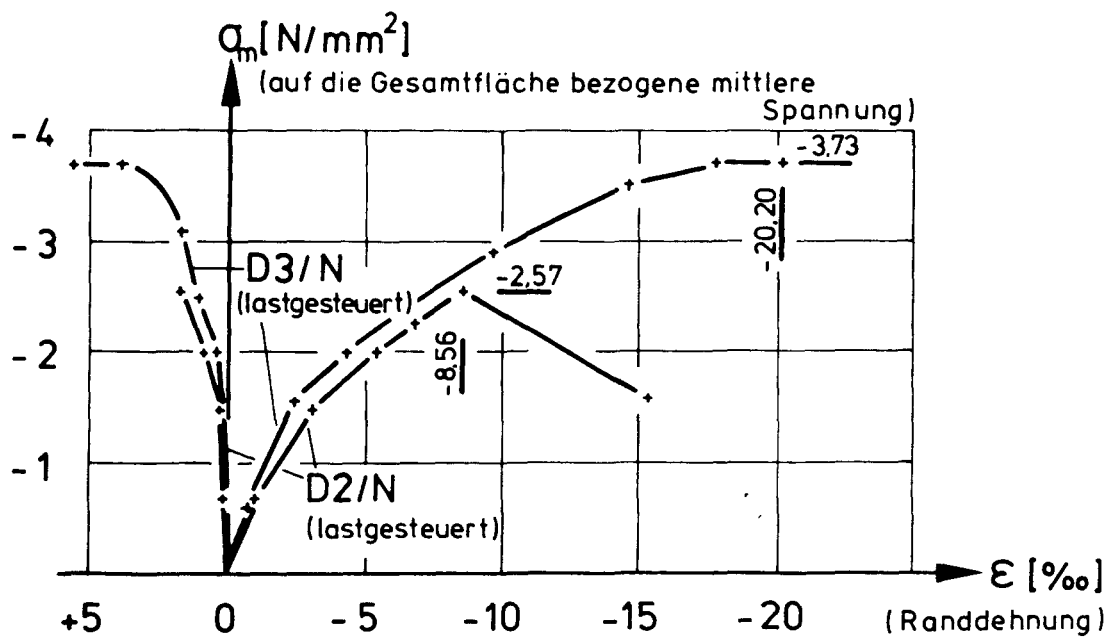


Bild 57: Randstauchungen und Krümmungen
Mauerwerkstyp D (ausmittige Belastung)

GLEICHGEWICHTSKONTROLLE

OHNE ANSATZ DES
VORHANDENEN PUTZES

GERECHNET

LST	p	p _L	HZ	N	M _L	M ₀	GEMESSEN		GERECHNET				GERECHNET			
							e _{st}	w	f	f-w	M _R	M _R /M ₀	f	f-w	M _R	M _R /M ₀

[/] [bar] [bar] [kN] [kN] [kNm] [kNm] [cm] [cm] [cm] [cm] [kNm] [/] [cm] [cm] [kNm] [/]

C1	0	0.00		5.1	9.5		5.76	0.00								
	1	0.05		6.9	12.0		6.32	0.10								
	2	0.10		8.3	15.1		6.35	0.16								
	3	0.15		10.6	18.9		6.30	0.23								
	4	0.20		14.1	24.1		6.21	0.25								
	5	0.25	0.13	16.1	27.2	3.8	6.21	0.34								
	6	0.29	0.16	18.6	31.7	4.4	6.09	0.43								
	7	0.35	0.19	22.3	38.5	5.2	6.04	0.59								
	8	0.40	0.21	25.4	44.8	6.0	5.97	0.75								
	9	0.45	0.24	28.7	52.1	6.7	5.97	0.98								
	10	0.50	0.27	32.2	60.5	7.6	5.99	1.27	12.2	10.9	6.6	0.878	11.2	9.9	6.0	0.798
	11	0.55	0.29	34.5	67.4	8.1	6.05	1.75	12.1	10.3	7.0	0.868	11.1	9.3	6.3	0.784
	12	0.55	0.29	34.7	69.0	8.2	6.14	1.79	12.0	10.3	7.1	0.878	11.0	9.3	6.4	0.792
	13	0.60	0.32	38.6	79.3	9.1	6.20	2.37	11.9	9.5	7.6	0.847	10.9	8.5	6.8	0.758
	14	0.60	0.34	40.5	87.4	9.5	6.29	4.85	11.8	(6.9	6.1	0.664)	10.8	(5.9	5.2	0.568)
	15	0.00		5.0	17.2											
C2	0	0.00		5.3	13.6		-0.08	0.00								
	1	0.05		6.4	13.8		0.08	0.01								
	2	0.10		7.0	14.4		0.97	0.02								
	3	0.15		9.8	18.6		2.21	0.09								
	4	0.20	0.10	12.5	22.6	2.9	3.71	0.17								
	5	0.25	0.13	15.0	27.4	3.5	4.45	0.26								
	6	0.30	0.14	17.3	31.7	4.1	4.98	0.35								
	7	0.35	0.17	20.7	39.3	4.9	5.18	0.48								
	8	0.40	0.20	23.4	44.0	5.5	5.57	0.61								
	9	0.45	0.22	26.9	50.7	6.3	5.82	0.76								
	10	0.50	0.24	29.0	54.7	6.8	6.28	0.97	12.2	11.3	6.2	0.911	11.2	10.3	5.6	0.830
	11	0.55	0.27	32.4	64.2	7.6	6.10	1.21	12.1	10.9	7.0	0.926	11.1	9.9	6.4	0.841
	12	0.55	0.27	31.8	63.9	7.5	6.39	1.33	12.1	10.8	6.9	0.929	11.1	9.8	6.3	0.843
	13	0.60	0.29	34.5	71.0	8.1	6.48	1.59	12.0	10.4	7.4	0.923	11.0	9.4	6.7	0.834
	14	0.60	0.28	33.8	70.3	7.9	6.63	1.67	12.0	10.4	7.3	0.926	11.0	9.4	6.6	0.837
	15	0.65	0.30	36.0	76.6	8.5	6.96	2.08	11.9	9.9	7.6	0.904	10.9	8.9	6.8	0.813
	16	0.65	0.30	36.2	81.8	8.5	6.81	2.35	11.9	9.5	7.8	0.930	10.9	8.5	7.0	0.832
	17	0.65	0.30	36.3	84.8	8.5	6.69	2.48	11.8	9.4	7.9	0.943	10.8	8.4	7.1	0.842
	18	0.65	0.30	36.6	86.0	8.6	6.52	2.59	11.8	9.2	7.9	0.938	10.8	8.2	7.1	0.836
	19	0.69	0.32	38.0	100.0	8.9	6.43	3.60	11.6	8.0	8.0	0.919	10.6	7.0	7.0	0.804
	20	0.00		0.0	0.0											
C3	0	0.00		9.7	16.2		5.31	0.00								
	1	0.05		10.5	17.6		4.88	0.00								
	2	0.10		11.5	17.8		5.51	0.02								
	3	0.15		12.8	19.5		5.59	0.05								
	4	0.00		9.3	16.1		5.30	0.01								
	5	0.00		9.1	15.7		5.30	0.01								
	6	0.10		11.3	18.0		5.48	0.03								
	7	0.15		12.6	19.4		5.58	0.05								
	8	0.20		14.1	21.7		5.66	0.08								
	9	0.25		16.1	25.6		5.77	0.15								
	10	0.30		18.3	30.8		5.85	0.26								
	11	0.00		7.5	13.8		5.10	0.05								
	12	0.00		7.3	13.8		5.11	0.05								
	13	0.15		11.0	18.9		5.58	0.12								
	14	0.30		18.4	31.1		5.89	0.29								
	15	0.35		20.4	35.7		5.96	0.39								
	16	0.40		22.9	42.1		5.99	0.56								
	17	0.45		25.3	48.0		6.02	0.74								
	18	0.00		5.4	10.6		4.75	0.13								
	19	0.00		5.5	10.8		4.82	0.13								
	20	0.15	0.08	9.9	19.2		5.57	0.30								
	21	0.30	0.14	17.2	33.7	4.0	5.91	0.37								
	22	0.45	0.21	25.2	49.7	5.9	6.01	0.86	11.3	10.5	5.2	0.884				
	23	0.50	0.24	28.3	57.6	6.6	6.04	1.10	11.2	10.1	5.8	0.882				
	24	0.55	0.25	30.2	64.6	7.1	6.08	1.40	11.1	9.7	6.3	0.891				
	25	0.60	0.26	31.0	77.6	7.3	6.07	2.30	10.9	8.6	6.7	0.932				
	26	0.00		2.4	7.7											
	27	0.00		3.6	7.7											
	28	0.55		0.0	-0.1											

1) Zeitliche Zugehörigkeit nicht gesichert

2) aus Durchbiegungsverlauf geschätzt

Tabelle 9: Gleichgewichtskontrolle
Mauerwerkstyp C

GLEICHGEWICHTSKONTROLLE

OHNE ANSATZ DES
VORHANDENEN PUTZES
GERECHNET

	LST	p	p _L	HZ	N	M _L	M _O	GEMESSEN		GERECHNET				GERECHNET			
								e _{st}	w	f	f-w	M _R	M _R /M _O	f	f-w	M _R	M _R /M _O
	[/]	[bar]	[bar]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[/]	[cm]	[cm]	[kNm]	[/]
D1	0	0.00		18.3	46.1			3.59	0.00								
	1	0.10		19.8	46.7			3.73	0.03								
	2	0.20		22.5	48.2			3.96	0.03								
	3	0.30		27.0	50.9			4.44	0.06								
	4	0.40		31.8	55.5			4.75	0.11								
	5	0.50		37.3	61.1			5.16	0.18								
	6	0.60		43.6	66.8			5.56	0.25								
	7	0.70	0.41	48.9	70.6	11.5	11.5	6.01	0.34								
	8	0.80	0.46	55.1	75.8	12.9	12.9	6.32	0.43								
	9	0.90	0.51	61.5	82.7	14.5	14.4	6.47	0.56								
	10	1.00	0.57	68.1	88.9	16.0	15.9	6.63	0.67								
	11	1.10	0.61	73.7	93.4	17.3	17.2	6.90	0.89								
	12	1.10	0.61	72.7	89.8	17.1	17.0	7.10	0.96								
	13	1.20	0.65	78.3	95.8	18.4	18.3	7.28	1.12								
	14	1.20	0.66	79.5	98.2	18.7	18.6	7.17	1.19								
	15	1.30	0.71	85.4	103.5	20.1	19.9	7.35	1.39	23.0	21.6	22.4	1.124	21.0	19.6	20.3	1.020
	16	1.30	0.70	84.2	98.1	19.8	19.6	7.56	1.52	23.2	21.7	21.3	1.085	21.2	19.7	19.3	0.986
	17	1.30	0.69	83.3	95.8	19.6	19.4	7.70	1.55	23.3	21.8	20.9	1.074	21.3	19.8	18.9	0.976
	18	1.40	0.74	89.3	101.4	21.0	20.8	7.83	1.66	23.1	21.5	21.8	1.046	21.1	19.5	19.7	0.949
	19	1.40	0.75	89.7	101.5	21.1	20.9	7.85	1.80	23.1	21.3	21.6	1.037	21.1	19.3	19.6	0.940
	20	1.40	0.73	88.1	98.6	20.7	20.5	7.91	1.86	23.2	21.4	21.1	1.028	21.2	19.4	19.1	0.932
	21	1.50	0.79	95.1	105.6	22.4	22.1	8.07	2.09	23.0	20.9	22.0	0.997	21.0	18.9	19.9	0.901
	22	1.50	0.80	95.8	105.8	22.5	22.2	8.23	2.27	22.9	20.7	21.9	0.984	20.9	18.7	19.8	0.888
	23	1.50	0.78	93.2	102.1	21.9	21.6	8.27	2.35	23.1	20.7	21.2	0.979	21.1	18.7	19.1	0.885
	24	1.60	0.83	99.2	107.8	23.3	23.0	8.39	2.54	22.9	20.3	21.9	0.953	20.9	18.3	19.8	0.859
	25	1.60	0.83	99.1	107.1	23.3	22.9	8.51	2.74	22.9	20.2	21.6	0.941	20.9	18.2	19.4	0.848
	26	1.60	0.81	97.6	104.9	22.9	22.6	8.63	2.85	23.0	20.1	21.1	0.936	21.0	18.1	19.0	0.843
	27	1.60	0.82	98.1	104.8	23.1	22.7	8.71	2.92	23.0	20.1	21.0	0.927	21.0	18.1	18.9	0.835
	28	1.65	0.84	100.6	106.7	23.6	23.2	8.84	3.07	22.9	19.8	21.2	0.911	20.9	17.8	19.0	0.819
	29	1.65	0.83	99.8	102.7	23.5	23.0	9.00	3.21	23.1	19.9	20.4	0.886	21.1	17.9	18.3	0.796
	30	1.65	0.82	98.8	99.0	23.2	22.8	9.21	3.33	23.2	19.9	19.7	0.863	21.2	17.9	17.7	0.776
	31	1.70	0.84	100.8	101.0	23.7	23.2	9.25	3.45	23.1	19.7	19.9	0.856	21.1	17.7	17.9	0.769
	32	1.70	0.84	100.3	99.3	23.6	23.1	9.37	3.61	23.2	19.6	19.4	0.842	21.2	17.6	17.5	0.756
	33	1.70	0.84	100.8	98.1	23.7	23.2	9.45	3.74	23.2	19.5	19.1	0.825	21.2	17.5	17.2	0.741
	34	1.70	0.83	99.4	94.8	23.4	22.8	9.63	3.98	23.4	19.4	18.4	0.805	21.4	17.4	16.5	0.722
	35	1.75	0.84	100.6	97.1	23.6	23.1	9.64	4.19	23.3	19.1	18.5	0.804	21.3	17.1	16.6	0.719
36	0.00	0.00	0.0	0.0													
D2	0	0.00		5.4	21.6			2.60	0.00								
	1	0.10		8.3	23.0			3.16	0.00								
	2	0.20		13.9	28.5			3.98	0.01								
	3	0.30	0.16	18.6	34.2	4.4	4.4	5.12	0.05								
	4	0.40	0.21	25.7	41.2	6.0	6.0	5.83	0.10								
	5	0.50	0.27	32.1	48.4	7.5	7.5	6.29	0.14								
	6	0.60	0.32	38.6	54.7	9.1	9.1	6.74	0.19								
	7	0.70	0.38	45.6	62.4	10.7	10.7	6.97	0.25								
	8	0.80	0.43	51.2	68.4	12.0	12.0	7.21	0.32								
	9	0.90	0.49	59.1	73.8	13.9	13.9	7.45	0.40								
	10	1.00	0.55	66.0	78.9	15.5	15.5	7.64	0.52								
	11	1.00	0.54	64.4	77.7	15.1	15.1	7.56	0.55								
	12	1.10	0.59	70.6	82.9	16.6	16.5	7.70	0.65								
	13	1.20	0.64	76.8	88.4	18.0	18.0	7.82	0.83								
	14	1.20	0.64	76.4	86.4	18.0	17.9	7.89	0.96								
	15	1.30	0.69	82.5	95.9	19.4	19.3	7.85	1.08	23.3	22.2	21.3	1.106	21.3	20.2	19.4	1.007
	16	1.30	0.69	83.0	96.4	19.5	19.4	7.87	1.17	23.3	22.1	21.3	1.101	21.3	20.1	19.4	1.001
	17	1.40	0.75	89.5	104.3	21.0	20.9	7.89	1.28	23.0	21.7	22.7	1.084	21.0	19.7	20.6	0.984
	18	1.40	0.74	89.1	104.2	20.9	20.8	7.90	1.45	23.0	21.6	22.5	1.081	21.0	19.6	20.4	0.981
	19	1.50	0.79	95.2	111.0	22.4	22.2	7.94	1.63	22.7	21.1	23.4	1.055	20.7	19.1	21.2	0.955
	20	1.50	0.79	94.8	109.9	22.3	22.1	8.03	1.80	22.8	21.0	23.1	1.045	20.8	19.0	20.9	0.945
	21	1.60	0.84	100.9	117.8	23.7	23.5	8.09	2.00	22.5	20.5	24.1	1.028	20.5	18.5	21.8	0.927
	22	1.60	0.84	100.6	116.1	23.6	23.4	8.19	2.12	22.6	20.4	23.7	1.014	20.6	18.4	21.4	0.914
	23	1.60	0.84	101.1	116.6	23.8	23.5	8.22	2.20	22.5	20.3	23.7	1.009	20.5	18.3	21.4	0.910
	24	1.70	0.89	106.9	122.3	25.1	24.8	8.37	2.43	22.3	19.9	24.3	0.980	20.3	17.9	21.9	0.881
	25	1.70	0.88	105.3	120.7	24.8	24.4	8.45	2.60	22.4	19.8	23.9	0.977	20.4	17.8	21.5	0.878
	26	1.80	0.94	112.6	130.1	26.5	26.1	8.57	2.90	22.0	19.1	24.9	0.954	20.0	17.1	22.3	0.854
	27	1.80	0.93	111.7	129.3	26.3	25.9	8.61	3.05	22.0	19.0	24.6	0.950	20.0	17.0	22.0	0.850
	28	1.80	0.93	111.4	129.9	26.2	25.7	8.63	3.24	22.0	18.8	24.4	0.948	20.0	16.8	21.8	0.847
	29	1.80	0.92	109.9	128.6	25.8	25.4	8.66	3.34	22.1	18.7	24.1	0.949	20.1	16.7	21.5	0.848
	30	1.90	0.97	115.8	136.9	27.2	26.7	8.80	3.60	21.8	18.2	24.8	0.930	19.8	16.2	22.1	0.827
	31	1.90	0.96	114.8	133.0	27.0	26.4	8.97	3.90	21.9	18.0	23.9	0.906	19.9	16.0	21.3	0.805
32	0.00	0.00	0.0	0.0													

Tabelle 10: Gleichgewichtskontrolle
Mauerwerkstyp D1, D2

GLEICHGEWICHTSKONTROLLE

OHNE ANSATZ DES
VORHANDENEN PUTZES
GERECHNET

LST	p	p _L	HZ	N	M _L	M _O	GEMESSEN		GERECHNET				GERECHNET			
							e _{st}	w	f	f-w	M _R	M _R /M _O	f	f-w	M _R	M _R /M _O
[/]	[bar]	[bar]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[/]	[cm]	[cm]	[kNm]	[/]
7	0.00		41.1	24.5			8.17	0.06								
8	0.30		43.6	28.6			8.41	0.07								
9	0.50		47.7	35.0			8.36	0.10								
10	0.60		50.1	38.5			8.26	0.13								
11	0.70		53.7	43.6			8.06	0.17								
12	0.80		58.0	48.8			7.94	0.21								
13	0.90		63.8	55.9			7.91	0.26								
14	1.00		69.3	63.3			7.88	0.32								
15	0.00		25.4	15.5			3.70	0.16								
16	0.00		25.4	15.0			4.06	0.16								
17	0.50		39.4	34.5			6.79	0.23								
18	1.00		67.9	63.4			7.94	0.35								
19	1.10		73.6	69.8			7.97	0.40								
20	1.20		80.3	78.2			7.90	0.48								
21	1.30		85.5	84.8			7.90	0.57								
22	1.40		92.3	93.2			7.94	0.67								
23	1.50		97.8	100.4			7.94	0.77								
24	0.00		13.0	8.9			-0.41	0.33								
25	0.00		12.8	9.3			0.12	0.33								
26	0.50		32.6	34.4			5.81	0.51								
27	1.00	0.52	61.9	65.5	14.6	14.5	7.31	0.67								
28	1.50	0.80	95.0	100.6	22.3	22.2	8.02	0.88	23.1	22.2	22.4	1.006	21.1	20.2	20.4	0.915
29	1.60	0.85	101.4	108.6	23.8	23.7	8.09	0.99	22.8	21.8	23.7	0.998	20.8	19.8	21.5	0.907
30	1.70	0.90	107.3	115.8	25.2	25.1	8.10	1.13	22.5	21.4	24.8	0.988	20.5	19.4	22.5	0.896
31	1.80	0.94	111.5	124.7	26.2	26.0	8.44	1.50	22.2	20.7	25.8	0.991	20.2	18.7	23.3	0.895
32	1.80	0.94	112.6	133.3	26.5	25.4	8.71	10.00	21.9	11.9	15.8	0.623	19.9	9.9	13.1	0.518
33	1.80	0.94	111.8	132.2	26.3	26.0	8.73	2.56	21.9	19.3	25.6	0.984	19.9	17.3	22.9	0.883
34	1.90	0.99	118.5	142.4	27.8	27.5	8.79	2.90	21.5	18.6	26.5	0.965	19.5	16.6	23.6	0.861
35	1.90	0.98	117.0	141.0	27.5	27.1	8.84	3.05	21.6	18.5	26.1	0.963	19.6	16.5	23.3	0.859
36	1.90	0.99	117.5	142.2	27.6	27.2	8.87	3.20	21.5	18.3	26.0	0.958	19.5	16.3	23.2	0.853
37	2.00	1.03	122.7	151.1	28.8	28.3	9.00	3.60	21.2	17.6	26.5	0.937	19.2	15.6	23.5	0.830
38	2.00	1.02	121.3	146.7	28.5	27.9	9.16	4.40	21.3	16.9	24.9	0.891	19.3	14.9	21.9	0.786
39	2.00	1.00	118.9	132.0	27.9	27.1	9.40	5.51	21.9	16.4	21.6	0.798	19.9	14.4	19.0	0.701
40	2.05	1.03	122.4	132.4	28.8	27.9	9.40	5.67	21.9	16.2	21.5	0.770	19.9	14.2	18.8	0.675
41	2.05	1.02	121.9	129.7	28.6	27.8	9.35	5.73	22.0	16.3	21.1	0.760	20.0	14.3	18.5	0.666
42	2.05	1.02	121.5	128.7	28.6	27.7	9.31	5.78	22.0	16.3	20.9	0.756	20.0	14.3	18.3	0.663
43	2.10	1.04	124.0	131.8	29.1	28.2	9.32	5.82	21.9	16.1	21.2	0.751	19.9	14.1	18.6	0.658
44	2.10	1.03	123.3	129.7	29.0	28.1	9.26	5.88	22.0	16.1	20.9	0.745	20.0	14.1	18.3	0.652
45	2.10	1.03	123.1	129.0	28.9	28.0	9.25	5.92	22.0	16.1	20.8	0.741	20.0	14.1	18.2	0.649
46	0.00	0.00	0.0	0.0												
0	0.00		45.0	23.4	10.6	10.6	9.13	0.00								
1	0.00		54.0	34.6	12.8	12.8	10.22	0.00								
2	0.00		54.7	35.6	12.9	12.9	9.75	0.00								
3	0.10		55.0	36.5	13.0	13.0	9.59	0.00								
4	0.20		53.8	36.3	12.7	12.7	9.80	0.00								
5	0.30		55.3	38.0	13.1	13.1	9.63	0.01								
6	0.40		55.7	39.6	13.2	13.2	9.51	0.02								
7	0.50		55.9	40.1	13.2	13.2	9.67	0.03								
8	0.00		52.5	34.2	12.4	12.4	9.71	0.01								
9	0.00		53.1	35.8	12.5	12.5	9.33	0.01								
10	0.30		53.3	36.9	12.6	12.6	9.67	0.02								
11	0.50		56.3	39.6	13.3	13.3	9.91	0.03								
12	0.60		55.5	43.3	13.1	13.1	9.41	0.05								
13	0.70		58.0	46.0	13.7	13.7	9.38	0.07								
14	0.80		58.7	49.8	13.9	13.9	9.23	0.12								
15	0.90		60.4	56.1	14.3	14.3	8.85	0.18								
16	1.00		62.5	60.8	14.8	14.7	8.74	0.27								
17	0.00		43.7	23.3	10.3	10.3	9.26	0.13								
18	0.00		42.8	22.3	10.1	10.1	9.44	0.12								
19	0.50		47.0	36.6	11.1	11.1	8.96	0.19								
20	1.00		61.5	60.6	14.5	14.5	8.96	0.32								
21	1.10		66.0	69.8	15.6	15.5	8.76	0.42								
22	1.20		72.4	81.0	17.1	17.0	8.79	0.63								
23	1.30	0.75	89.7	103.9	21.2	21.0	8.80	1.29	21.0	19.7	20.5	0.973				
24	1.40	0.79	94.7	112.7	22.4	22.2	8.92	1.60	20.7	19.1	21.5	0.968				
25	1.50	0.85	102.0	124.8	24.1	23.8	8.85	2.00	20.2	18.2	22.7	0.953				
26	0.00		10.4	1.5			11.56	1.00								
27	0.00		56.9	8.2			11.54	1.03								
28	0.50		53.8	31.3			8.10	1.40								
29	1.00		62.0	57.5			8.36	1.70								
30	1.50		77.7	91.8			8.57	1.99								
31	1.60	0.88	105.2	127.7	24.9	24.6	8.92	2.30	20.1	17.8	22.7	0.924				
32	0.00	0.17	20.6	0.1												

Tabelle 11: Gleichgewichtskontrolle
Mauerwerkspfeiler D3, D4